



Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

- + *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.
- + *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.
- + *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.
- + *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página <http://books.google.com>



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>

NEDL TRANSFER



HN 4NIE D

~~Scl 1480.159~~

KG 539

HARVARD COLLEGE LIBRARY



BOUGHT FROM THE INCOME OF THE FUND
BEQUEATHED BY

PETER PAUL FRANCIS DEGRAND

(1787-1855)

OF BOSTON

FOR FRENCH WORKS AND PERIODICALS ON THE EXACT SCIENCES
AND ON CHEMISTRY, ASTRONOMY AND OTHER SCIENCES
APPLIED TO THE ARTS AND TO NAVIGATION

*1916
M.*

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie},
59620 Quai des Grands-Augustins, 55.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS A ÉTÉ RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE LE 7 DÉCEMBRE 1886

TROISIÈME SÉRIE.
TOME IX. — ANNÉE 1919.



SIÈGE SOCIAL } 12 et 14, rue de Staël.
LABORATOIRE }
à Paris.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET C^e, ÉDITEURS,
LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

~~1466.157~~

✓
KG 539

Lib. 195
HARVARD UNIVERSITY
LIBRARIES SCHOOL

Desmond

TRANSFERRED TO
HARVARD COLLEGE LIBRARY

C

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS. *Appl. Hy.*

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.

SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.



LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)
PARIS 30 FR. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE . . 32 FR.
Prix du numéro : 3 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de poste.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS,
LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits.

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine) et à LYON.

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

Pour la *Commande de :*

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines
installées en France
par la **Compagnie Electro-Mécanique**
et ses Licenciés,

plus de 1.200.000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Stations Centrales.

Transports de Force.

**Traction électrique par courant
continu et par courant alternatif.**

Éclairage électrique des trains.

**Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.**

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminoirs.

**Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.**

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

FILS ET CABLES

POUR L'ÉLECTRICITÉ

R. ALLIOT & ROL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

38, rue de Reuilly, 38

PARIS

TÉLÉPHONE

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}

Quai des Grands-Augustins, 55, à Paris (6^e).

POMEY (J.-B.), Ingénieur en chef des Postes et Télégraphes. — Cours d'Electricité théorique, professé à l'École supérieure des Postes et Télégraphes; avec une *Préface* de L. LECORNU, Membre de l'Institut (*Bibliothèque des Annales des P. T. et T.*), 2 volumes in-8 (25-16) se vendant séparément.

TOME I : Volume de VIII-396 pages, avec 90 figures; 1914 13 fr.

TOME II (*Sous presse.*)

PONCHARRA (F. de), Ingénieur des Arts et Manufactures. Diplômé de l'École supérieure d'Electricité. — *Propriétés et essais des matériaux de l'Électrotechnique.* In-8 (19-12) de 152 pages, avec 28 figures; 1904.

Broché. 2 fr 50 c. | Cartonné..., 3 fr.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie},

Quai des Grands-Augustins, 55, à Paris (6^e).

Envoi franco dans toute l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris.

L'ÉLECTRICITÉ DANS LES MINES

APPLICATIONS DIVERSES. EXTRACTION,

PAR

E.-J. BRUNSWICK,

Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur en chef de la Maison Breguet

IN-8 (25-16) DE VIII-254 PAGES, AVEC 68 FIGURES; 1910. 7 FR. 50 c.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 9 janvier 1919 : Admission de Membre titulaire, p. 6. — Sociétaires décédés, p. 6. — Un point rétrospectif dans l'histoire des unités électriques : les mesures internationales de Washington (M. Paul Janet), p. 7. — Étude sur la marche en parallèle des alternateurs (M. de Marchena), p. 17. — L'avenir de l'industrie électrique en Roumanie (M. Hurmuzescu), p. 43. — Mémoire présenté : Le chemin de fer électrique à écartement de 0,60 m (M. Esbran), p. 53.

IL Y A TRENTE ANS, p. 72.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du jeudi 9 janvier 1919 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. A. LARNAUDE.

La séance est ouverte à 20 h 35 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Est élue membre titulaire de la Société :

M^{lle} **Kahn** (Denise-Clairette-Alice), Ingénieur E. S. E., attachée au Service du calcul des transformateurs de la Compagnie Electromécanique, 5, rue Gœthe, Paris, 16^e. —
Présentée par MM. Janet et Chaumat.

M. le PRÉSIDENT a le regret de faire part du décès de MM. *Jacques Belot, Martel, Rolland, Vives y Navaro*, et de la mort au champ d'honneur de :

M. *Cabaret (André)*;

M. *Gilotaux (G.)*, tué en mars 1915, à Tahure.

Il adresse les condoléances de la Société aux familles éprouvées par ces deuils.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

**UN POINT RÉTROSPECTIF DANS L'HISTOIRE DES UNITÉS ÉLECTRIQUES :
LES MESURES INTERNATIONALES DE WASHINGTON.**

M. Paul JANET. — « Les questions relatives aux unités et étalons électriques ne sont pas de celles qui ont le don d'exciter un bien vif intérêt, et je n'aurais pas songé à vous entretenir ce soir d'un point rétrospectif de leur histoire, si notre laboratoire n'y avait été mêlé de très près. La publication de documents diplomatiques est aujourd'hui à la mode, et, dans leur sphère très modeste, ceux que je vais mettre sous vos yeux méritent peut-être d'être tirés de l'oubli.

» La Conférence officielle de Londres en 1908 s'était terminée, comme on s'en souvient, par la formation d'un Comité international de 15 membres, sans caractère officiel, ayant pour mission la continuation de l'œuvre de la Conférence de Londres. La nomination des membres de ce Comité avait été confiée à Lord Rayleigh. La France y eut deux représentants dont l'un fut notre ancien Président, M. G. Lippmann, et l'autre l'un de nos membres d'honneur, M. M. Benoît. A sa première séance, ce Comité nomma pour président, M. Warburg, président de l'Institut physico-technique de Berlin; pour vice-président, M. Glazebrook, directeur du National Physical Laboratory de Londres; comme trésorier, M. Stratton, directeur du Bureau of Standards de Washington, et comme secrétaire, M. Rosa, physicien au Bureau of Standards. De plus, le Comité s'adjoignit cinq membres associés parmi lesquels j'eus l'honneur d'être désigné. L'un des buts du Comité ainsi formé était d'obtenir la collaboration des laboratoires d'étalonnement des divers pays pour tous les cas où la coopération de ces établissements serait nécessaire.

» Un des points qui restait en suspens à cette époque était le défaut de concordance entre les mesures faites sur le voltamètre à dépôt d'argent qui, on s'en souvient, devait, d'après les décisions de la Conférence de Londres, servir à la définition de l'ampère. Des divergences de quelques dix-millièmes subsistaient encore entre les différents laboratoires; il était indispensable de rechercher, par des expériences comparatives, d'où venaient ces divergences.

» Dans une lettre adressée le 15 mars 1909 au Président et au vice-président du Comité, MM. Stratton et Rosa proposèrent que ces recherches fussent entreprises à Washington dans les labo-

ratoires du Bureau of Standards. Il était suggéré dans cette lettre que « si les représentants des différents laboratoires pouvaient » consacrer un mois ou deux à fabriquer des éléments étalons et » à travailler avec le voltamètre d'argent, nous pourrions arriver » à un accord complet, non seulement sur les valeurs numériques, » mais encore sur les spécifications et les manières d'opérer ». Cette proposition rencontra une entière approbation et, en conséquence, les deux circulaires suivantes furent envoyées aux différents membres du Comité.

COMITÉ SCIENTIFIQUE INTERNATIONAL POUR LES UNITÉS
ET ÉTALONS ÉLECTRIQUES.

(Circulaire).

Charlottenbourg et Washington, 1^{er} juin 1909.

Monsieur et cher Collègue,

Il est à désirer qu'une valeur définitive pour l'élément Weston normal soit adoptée simultanément dans les différents pays. Pour cela, les différentes valeurs de l'élément résultant des mesures de divers expérimentateurs par le voltamètre à argent devraient s'écarter de leur valeur moyenne de moins de $\frac{1}{10000}$ de volt. Ce degré de concordance n'a pas encore été atteint.

Par conséquent, le Comité demande que l'adoption d'une valeur définitive de l'élément normal soit remise jusqu'à ce que le Comité juge cette valeur obtenue.

Le Président,
WARBURG.

Le Secrétaire,
ROSA.

COMITÉ SCIENTIFIQUE INTERNATIONAL POUR LES UNITÉS
ET ÉTALONS ÉLECTRIQUES.

(Circulaire.)

Charlottenbourg et Washington, 20 juin 1909.

Monsieur et cher Collègue,

MM. Stratton et Rosa proposent qu'un membre du corps scientifique des deux institutions, le National Physical Laboratory et le Physikalisch-Technische Reichsanstalt, soit envoyé à Washington en octobre 1909, pour une période d'un ou deux mois afin de faire des recherches en commun avec le Bureau of Standards sur l'élément normal et le voltamètre à argent. On essaierait dans ces recherches de s'entendre sur les valeurs numériques et les spécifications. Le trésorier du Comité,

M. Stratton, se tient prêt à procurer les fonds nécessaires aux frais de voyage. Ce travail serait considéré comme entrepris par le Comité international, auquel un rapport des résultats serait soumis.

Les soussignés mettent ce plan aux voix et vous prient d'envoyer l'expression de votre opinion au Président.

Le Président,
WARBURG.

Le Secrétaire,
ROSA.

» Le principe proposé dans ces circulaires était excellent et ne pouvait qu'être approuvé, mais nous ne pûmes nous empêcher, M. Lippmann, M. Benoît et moi-même, de constater avec regret le silence observé dans ces circulaires sur la collaboration possible du Laboratoire central d'Électricité aux recherches internationales projetées; aussi nous mîmes-nous d'accord pour adresser à M. Warburg la lettre suivante :

Paris, le 16 juillet 1909.

A Monsieur E. Warburg, président de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, Marchstrasse, à Charlottenbourg (Allemagne).

Monsieur le Président et cher Collègue,

Nous avons l'honneur de vous accuser réception de votre circulaire en date du 20 juin 1909.

Nous approuvons entièrement le principe d'expériences en commun qui y est proposé : d'abord parce que de telles expériences permettront de comparer par une mise en série les voltamètres à argent qui ont été employés dans divers laboratoires; et ensuite parce que, dans notre conviction, une collaboration immédiate des expérimentateurs des différents pays permettra seule d'arriver à l'entente finale.

C'est précisément pour cette dernière raison que nous estimons nécessaire que les laboratoires qui ont travaillé le plus activement aux questions relatives aux unités électriques envoient des représentants autorisés à Washington pour collaborer à l'œuvre commune.

Parmi eux, le Laboratoire Central d'Électricité de Paris s'est, comme vous le savez, occupé activement depuis plusieurs années de ces études qu'il poursuit encore à l'heure actuelle.

Ce laboratoire, fondé par décret présidentiel du 24 février 1882, et dont le directeur est nommé par l'État, a d'ailleurs toute l'autorité d'un établissement officiel pour participer à une œuvre internationale de ce genre.

En conséquence, nous ne pouvons adhérer à la proposition qui nous est soumise que si la première phrase en est modifiée de la façon suivante :

« Qu'un membre du corps scientifique des trois institutions : le National Physical Laboratory, le Physikalisch-Technische Reichsanstalt et le Laboratoire Central d'Électricité, soit envoyé à Washington en octobre 1909, pour une période d'un ou deux mois afin de faire des recherches en commun avec le Bureau of Standards sur l'élément normal et le voltamètre à argent. »

Nous vous prions de vouloir bien soumettre ce texte, ainsi modifié, à l'approbation des membres du Comité scientifique international pour les Unités et Étalons électriques.

Veuillez agréer, Monsieur le Président et cher Collègue, l'assurance de notre haute considération.

Signé : MM. LIPPMANN, BENOIT, JANET.

» Le 22 septembre 1909, nous recevions la réponse que voici :

22 septembre 1909.

A Monsieur le Professeur Gabriel Lippmann, Paris,

Monsieur Lippmann et cher Professeur,

Il y a plusieurs mois, le Professeur Stratton et moi-même suggérons des recherches communes sur certaines des questions indéterminées se rattachant au voltamètre d'argent et à la pile étalon, afin d'obtenir un accord meilleur sur la spécification de ces étalons concrets. Nous proposons, sous la réserve que le Comité international des Unités et Étalons électriques donnerait son approbation, qu'un délégué du Physikalisch-Technische Reichsanstalt et un autre délégué du National Physical Laboratory viendraient à Washington et entreprendraient, avec des représentants du Bureau of Standards, dans nos laboratoires, une série d'expériences pour découvrir, si possible, les origines des différences que nous avons trouvées entre certains de nos travaux et les leurs. Nous avons la certitude que, si une telle contradiction était élucidée, nous tomberions d'accord sur les spécifications détaillées et probablement sur la valeur numérique à assigner à l'élément normal Weston.

1. Les raisons qui nous engageaient à demander l'envoi de délégués par ces deux établissements étaient les suivantes :

Nous estimions certain que chacun de ces établissements choisirait l'homme dont les travaux avaient été récemment discutés et sur les travaux duquel ils avaient grandement basé leurs recommandations relatives aux spécifications.

Le Dr Jaeger et M. Smith ont acquis la plus large expérience dans ce genre de travaux concernant les piles étalons et le voltamètre d'argent. Mais les résultats

obtenus au Physikalisch-Technische Reichsanstalt pour les piles étalons ne concordent pas sur tous les points avec les résultats du National Physical Laboratory et du National Bureau of Standards, bien que les résultats obtenus dans ces deux dernières institutions soient concordants dans presque chaque détail. D'autre part, les résultats obtenus au National Physical Laboratory avec le voltamètre d'argent n'ont pas été confirmés par nos propres travaux sur certains points importants, tandis que, au Physikalisch-Technische Reichsanstalt, la forme Rayleigh de voltamètre, le plus souvent usitée et préférée au National Physical Laboratory, n'était pas employée. Il semblait donc nécessaire que des représentants de ces trois établissements viennent enfin ici et essayent de concilier leurs contradictions.

2. Pour l'adjonction d'une quatrième institution (qui serait naturellement le Laboratoire Central d'Électricité), nous étions influencés par les considérations suivantes :

En ce qui regarde la pile étalon, le Laboratoire Central d'Électricité dut déterminer comment certains éléments, faits de matériaux préparés par différentes personnes, concordaient, et il exécuta plusieurs expériences sur le voltamètre d'argent; mais, comme nous le comprenions, il n'y avait au Laboratoire Central d'Électricité aucune personne spéciale qui ait porté une attention toute particulière à la fois à la pile étalon et au voltamètre d'argent.

En ce qui concerne le voltamètre, les dépôts d'argent obtenus au Laboratoire Central d'Électricité ont été apparemment plus lourds que ceux obtenus au National Physical Laboratory, et en cela nous avons eu une expérience similaire, bien que l'excédent ne soit pas si grand. Nous pensons que si la cause de la différence entre nos résultats et ceux du National Physical Laboratory était éclaircie, cela expliquerait probablement en même temps la haute valeur obtenue au Laboratoire Central d'Électricité. Pour ces raisons, il ne semblait pas aussi nécessaire qu'un quatrième membre fût adjoint au Comité.

Une autre raison était que ces expériences sont d'une telle nature qu'un grand nombre de personnes ne peut y participer sans inconvénient. Le montage des voltamètres, la mesure du courant électrique, le lavage, le séchage et le pesage de l'argent déposé sont des opérations très minutieuses, quand il faut atteindre une précision d'un cent-millième pour certaines parties : et telles sont les opérations qu'implique la préparation des piles étalons. Deux personnes peuvent travailler bien plus commodément que trois pour ce genre d'investigations, et quatre personnes semblaient un nombre excessif. Chaque délégué aurait ses propres instruments et produits chimiques, dont beaucoup d'entre eux seraient apportés avec lui.

Chaque délégué monterait des piles ou des voltamètres à sa façon avec ses propres matériaux, et aussi avec les matériaux de chacun des autres chercheurs. Avec quatre personnes les recherches deviendraient une opération très complexe. Les difficultés seraient proportionnelles au carré, ou plus encore peut-être du nombre des participants. La surface des laboratoires et la quantité d'appareils

exigés pour de si délicates opérations grèveraient nos ressources, à moins de prolonger les travaux ou de modifier le plan.

Finalement, les dépenses des recherches seraient considérablement accrues, et cela semblait mériter d'être pris en sérieuse considération pour le cas où nous ferions la proposition.

3. Il est entendu, naturellement, que les résultats obtenus par ces recherches communes ne sont ni définitifs ni obligatoires, mais qu'ils seront soumis au Comité international et que toute facilité de les vérifier sera donnée à tout membre du Comité ou à tout autre chercheur agissant au nom de chacun des pays représentés au Comité. Les recherches communes ne sont pas faites *pour et par* les trois pays dont nous proposerions l'envoi de délégués, mais *pour et par* le Comité international des Unités et Étalons électriques, avec la présomption qu'un étroit Comité pourrait faire un travail plus effectif qu'un grand. Dans un avenir prochain, il peut paraître sage de choisir un même Comité plus restreint pour un travail spécial,

4. Nous espérons que notre proposition rencontrerait une approbation unanime, et nous avons été chagrinés que certains y aient vu une injustice à l'égard du Laboratoire Central d'Électricité. Nous espérons que ces explications mettront le sujet dans une autre lumière. Si, après ces explications, les membres français du Comité international estiment encore qu'il serait meilleur d'avoir quatre participants aux recherches communes, dont l'un nommé par le Directeur du Laboratoire Central d'Électricité, nous soumettrons, sans autre objection, la question au Comité international; si ce dernier approuve, nous ferons les préparatifs nécessaires. J'ai longuement parlé de ce sujet avec le Professeur Stratton, qui est entièrement d'accord sur le contenu de cette lettre.

Nous désirons grandement que tous les membres de Comité soient satisfaits du plan et du but des recherches; nous espérons qu'ils seront également satisfaits des résultats obtenus.

— Cette lettre a été retardée par les interruptions et les absences des vacances de l'été et par l'ajournement du début des recherches, jusqu'au 1^{er} avril 1910. J'en adresse une copie à M. Benoît et à M. Janet, au Professeur Warburg, président, et au Dr Glazebrook, vice-président du Comité.

Pour conclure, je désire exprimer le sincère regret que le Professeur Stratton et moi-même avons éprouvé de prime abord, de n'avoir pas estimé pratique d'inviter un représentant du Laboratoire Central d'Électricité. Nous vous assurons que, s'il vous semble faisable, à vous, à vos collègues et au Comité international, d'élargir le Comité spécial proposé, nous ferons tout ce qui est en notre pouvoir pour faire réussir l'œuvre des délégués et rendre leur visite agréable.

Comptant sur votre prompte réponse, je suis, avec ma très haute considération, votre très dévoué

Rosa.

: » Les raisons contenues dans cette lettre étaient fort sérieuses et méritaient d'être prises en grande considération. Mais comme d'une part les recherches étaient ajournées au mois d'avril 1910, et que, d'autre part, d'importants travaux sur l'électrolyse de l'argent étaient en cours au Laboratoire Central, nous résolûmes d'ajourner notre réponse jusqu'à l'achèvement de ces travaux.

» Ce fut donc seulement le 8 février 1910 que nous écrivîmes à M. Warburg la lettre suivante :

Paris, le 8 février 1910.

A Monsieur Warburg, président de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, à Charlottenbourg (Allemagne).

Monsieur le Président et cher Collègue,

Nous avons le plaisir de vous informer que les expériences entreprises au Laboratoire Central d'Électricité sur l'équivalent électrochimique de l'argent sont terminées; les résultats résumés de ces expériences sont contenus dans une Note présentée par MM. F. Laporte et P. de la Gorce à l'Académie des Sciences dans sa séance du 24 janvier dernier et insérée aux *Comptes rendus* le 31 janvier. Le Mémoire développé relatif à ces mesures sera inséré au *Bulletin de la Société internationale des Électriciens* dans son numéro de mars. Nous nous empresserons de vous en envoyer des épreuves dès que nous les aurons à notre disposition.

Dans ces conditions, nous avons l'honneur de vous rappeler notre lettre du 16 juillet dernier par laquelle nous propositions d'envoyer un représentant du Laboratoire Central d'Électricité à Washington pour prendre part, conjointement avec les représentants du National Physical Laboratory et du Physikalisch-Technische Reichsanstalt, aux expériences projetées sur les éléments étalons et l'électrolyse de l'argent.

Nous vous prions, de nouveau, de vouloir bien soumettre cette proposition à l'approbation du Comité scientifique international.

Les raisons que nous vous donnons dans la lettre précitée ont encore plus de poids à l'heure actuelle, puisque les expériences, qui étaient alors en cours, sont terminées.

Nous ajouterons que, pour éviter toute difficulté matérielle, nous sommes prêts à verser, s'il est nécessaire, entre les mains du trésorier du Comité scientifique international, notre part contributive aux frais des expériences projetées.

Veuillez agréer, Monsieur le Président et cher Collègue, l'assurance de notre considération très distinguée.

Signé : MM. LIPPMAUN, BENOIT, JANET.

» Voici la réponse que M. Lippmann reçut quelques jours après :

Charlottenbourg, le 10 février 1910.

*Le Président du Bureau impérial physico-technique,
à Monsieur le Professeur G. Lippmann, Paris.*

Très honoré Collègue,

En possession de votre lettre du 8 février 1910, je vous informe que, à la date du 21 juillet 1909, j'ai transmis en copie votre proposition du 16 juillet 1909 au Secrétariat du Comité international, M. le Professeur Rosa, avec cette remarque : « Cette proposition doit être l'objet d'un vote et j'y joins une circulaire y relative. » J'ai pourtant laissé le soin à M. Rosa de se mettre préalablement en rapport direct avec vous. Ceci a été fait : M. Rosa, à la date du 22 septembre 1909, vous a écrit une lettre, dans laquelle il vous a exposé les vues du Bureau of Standards relatives à ce sujet. Cette lettre étant restée sans réponse, M. Rosa ne put savoir si vous approuviez ou non les vues du Bureau of Standards. Par suite l'affaire resta en suspens.

Le 10 janvier 1910, j'ai transmis à M. Rosa le texte d'une circulaire destinée à soumettre au vote du Comité votre proposition du 16 juillet 1909. Je l'ai prié de joindre à la circulaire la copie de votre lettre du 18 juillet 1909. Puis, le 4 février 1910, j'ai informé M. Rosa que je n'avais pas encore reçu la proposition.

Maintenant j'enverrai à M. Rosa une copie de votre lettre du 8 février 1910 et le prierai d'activer l'affaire.

En vous priant de communiquer la présente à MM. Benoît et Janet, je reste votre très dévoué.

Signé : E. WARBURG.

» La circulaire dont il est question dans cette lettre était ainsi conçue :

COMITÉ SCIENTIFIQUE INTERNATIONAL POUR LES UNITÉS
ET ÉTALONS ÉLECTRIQUES.

Charlottenbourg et Washington, le 8 février 1910.

Monsieur et très honoré Collègue,

Le 20 juin 1909, les soussignés ont demandé l'approbation d'un plan suivant lequel un membre du National Physical Laboratory et du Physikalisch-Technische Reichsanstalt seraient envoyés à Washington pour entreprendre des expériences en commun avec le National Bureau of Standards sur l'élément normal et le voltamètre à argent. Cette proposition a été approuvée par le Comité international et ces expériences vont être commencées le 1^{er} avril 1910.

MM. Lippmann, Benoît et Janet ont demandé; le 16 juillet 1909, qu'un membre du Laboratoire Central d'Électricité prenne part aux expériences qui seront faites en commun à Washington.

Par la présente, nous mettons aux voix cette dernière proposition et vous prions de faire connaître votre avis sur cette question au soussigné président (*adresse : Marchstrasse 25 a, Charlottenburg*).

Vous trouverez ci-joint un extrait de la lettre de MM. Lippmann, Benoît et Janet qui contient leur proposition.

Le Président,
E. WARBURG.

Le Secrétaire,
E.-R. ROSA.

» Il ne restait plus qu'à attendre le résultat de cette circulaire. Nous l'apprîmes par la lettre suivante qui me fut adressée par le Dr Glazebrook :

Teddington, 24 février 1910.

Cher Professeur Janet,

J'apprends avec plaisir par M. Warburg ce matin, qu'il a reçu des membres du Comité des votes lui prouvant qu'il est souhaité qu'un de vos représentants aille à Washington avec M. Smith et le Dr Jaeger. Veuillez me faire savoir si vous désirez qu'il soit fait quelque chose afin d'assurer l'avantage complet de votre coopération à ce travail.

Votre sincèrement dévoué,
R.-J. GLAZEBROOK.

» C'est par cette lettre que se termine la série de documents que je m'étais proposé de vous communiquer et que se conclut la réussite des négociations que nous avons engagées. Je n'ai pas à vous exposer aujourd'hui comment les recherches furent conduites et quel en fut le résultat. Notre délégué, M. F. Laporte, s'acquitta de sa mission d'une manière qui fait honneur à la science française, et c'est à lui que fut confiée la tâche délicate de rédiger les conclusions de la longue série de mesures qui remplit les mois d'avril et de mai 1910. Le rapport complet sur ces expériences fut publié en janvier 1912 et forme un volume de 200 pages environ qui sera une base solide pour les décisions à venir.

» Des documents qui précèdent, je voudrais tirer deux conclusions : la première est que, dans les circonstances que j'ai rappelées, le Laboratoire Central d'Électricité a joué, au point de vue français, un rôle de première importance. Si notre Société n'avait pas créé, organisé et entretenu ce laboratoire, nous nous serions trouvés complètement désarmés pour demander la participation

de l'un de nos compatriotes aux expériences internationales projetées. La Société des Électriciens a donc rendu là à la science française un service éminent et qui ne doit pas être oublié.

» La seconde, c'est que, dans ces circonstances, comme dans plusieurs autres, nous avons souffert de l'absence, en France, d'un laboratoire national analogue, par l'ampleur des ressources, à ceux qui existent à l'étranger. Notre laboratoire, avec des moyens notoirement insuffisants, a représenté dans cette occasion et doit constituer désormais la section électrique de ce laboratoire national. C'est là un point de vue que j'ai toujours soutenu, et je dois constater avec satisfaction que ce point de vue commence à être généralement adopté. Il en sortira, je l'espère, le développement nécessaire de notre laboratoire que nous devons tous souhaiter. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Janet.

ÉTUDE SUR LA MARCHÉ EN PARALLÈLE DES ALTERNATEURS.

M. DE MARCHENA. — « Le présent travail n'a pas pour but d'ajouter quelque chose à la théorie de la marche en parallèle des alternateurs.

» Cette question a fait depuis longtemps, de la part de plusieurs savants (parmi lesquels il suffit de rappeler les noms de M. Cornu, de M. Blondel et de M. Boucherot), l'objet de travaux devenus classiques d'un caractère trop complet et définitif pour qu'il puisse leur être ajouté quelque chose.

» Son but est seulement d'examiner de plus près les conditions dans lesquelles doit se faire l'application des théories déjà bien connues pour éviter des erreurs, souvent difficiles à réparer.

» L'idée m'en a été inspirée par les difficultés rencontrées dans la marche en parallèle de divers groupes électrogènes à combustion interne installés dans l'usine de La Rochelle, à la suite desquelles cette question a fait l'objet de ma part d'une étude approfondie (1).

» Comme on le sait, les alternateurs couplés en parallèle sont maintenus au synchronisme par les actions électromagnétiques qui s'exercent entre eux dès qu'ils sont écartés de leur position d'équilibre; celles-ci donnent lieu en les y rappelant à des oscillations dont la périodicité dépend à la fois des caractéristiques électriques des alternateurs et de l'inertie des masses mobiles.

» Quand les irrégularités du couple mécanique qui donnent naissance à ces oscillations, au lieu d'être isolées se succèdent à des intervalles réguliers dont la périodicité se rapproche de celle des oscillations, les mouvements pendulaires vont en s'accroissant et, quand il y a résonance entre les deux périodicités, ils peuvent prendre une amplitude telle que la marche en parallèle devienne impossible.

» C'est cette coïncidence qu'il s'agit d'éviter dans toutes les conditions de marche.

» Comme le couple mécanique peut présenter des harmoniques de périodicités très variables et formant une échelle étendue à

(1) Pour cette étude, des renseignements très utiles m'ont été fournis par nos collègues: M. Roth, ingénieur de la Société alsacienne, et M. Rodier, directeur de la Compagnie du gaz de la Rochelle.

partir de la plus basse, le moyen le plus sûr, pour éviter la possibilité de résonance, consiste à établir les groupes électrogènes à coupler de telle sorte que la fréquence de leurs oscillations propres soit inférieure à celle de toutes les irrégularités du couple mécanique ayant un caractère périodique.

» Ceci exige, naturellement, de se rendre un compte exact :

» 1^o De la périodicité véritable des oscillations propres des groupes électrogènes considérés;

» 2^o De la valeur la plus basse que puisse prendre la périodicité des perturbations à envisager du couple mécanique.

» Dans ce qui va suivre, nous allons d'abord, pour plus de simplicité, examiner le cas d'un alternateur couplé à un réseau de puissance infinie par rapport à sa puissance propre et de fréquence parfaitement constante. Nous examinerons ensuite comment les résultats se modifient quand il s'agit du couplage de groupes de puissance comparable.

» Nous désignerons par :

U la différence de potentiel aux bornes de l'alternateur;
 E , la force électromotrice induite;
 I , le courant débité;
 φ le décalage de ce courant par rapport à U ;
 γ l'angle de décalage entre E , et U ;
 e , la résultante de E , et de U ;
 Z , la réactance du stator dont nous supposons la résistance comparativement négligeable;
 $2p$ le nombre de pôles;
 Ω la vitesse angulaire de rotation;
 W_γ la puissance correspondant à l'angle γ ;
 C_γ le couple correspondant à W_γ ;
 C_0 le couple de pleine charge;
 I_0 le courant de pleine charge;
 C_s le couple synchronisant.

» *Calcul du couple synchronisant.* — La puissance utile développée par l'alternateur est donnée par l'expression

$$(1) \quad W_\gamma = UI_1 \cos \varphi = \frac{Ue_1}{Z_1} \cos \varphi.$$

» Si nous traçons le diagramme de fonctionnement de l'alter-

nateur (voir *fig. 1*) nous voyons que

$$e_1 \cos \varphi = E_1 \sin \gamma.$$

» Par suite

$$W_\gamma = \frac{UE_1}{Z_1} \sin \gamma,$$

$$(1') \quad C_\gamma = \frac{UE_1}{\Omega Z_1} \sin \gamma.$$

» D'autre part, le couple de pleine charge C_0 a pour expression

$$C_0 = \frac{UI_0}{\Omega}.$$

» En divisant membre à membre il viendra

$$(2) \quad C_\gamma = C_0 \frac{E_1}{Z_1 I_0} \sin \gamma.$$

» Si nous supposons l'alternateur écarté d'un angle δ_γ de sa position d'équilibre par une impulsion passagère, le couple C_γ

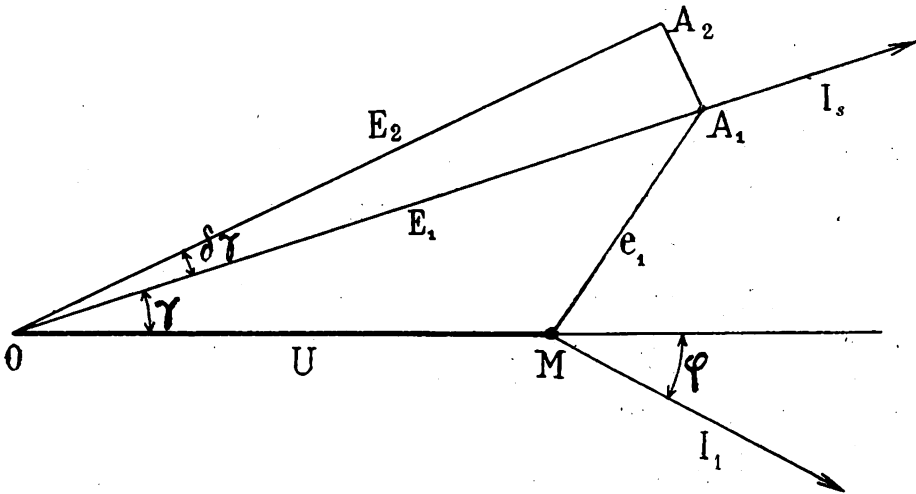


Fig. 1.

éprouvera une augmentation qui représentera le couple synchronisant C_s , dont nous avons à déterminer la valeur.

» Pour une réactance Z_1 indépendante de $\varphi + \gamma$ le couple C_s pourrait, pour de petites valeurs de δ_γ , s'obtenir par la simple différentiation de l'équation (2).

» On aurait alors

$$C_s = C_0 \frac{E_1}{Z_1 I_0} \cos \gamma \delta_\gamma.$$

» Mais Z_1 varie avec γ de telle sorte que c'est en réalité la différentielle de $\frac{\sin \gamma}{Z_1}$ qu'il s'agit de déterminer.

» Si nous représentons (voir fig. 1) par OA_2 le vecteur représentant en grandeur et en phase la force électromotrice E_2 de l'alternateur, quand celui-ci a été déplacé de l'angle δ_γ , nous voyons que le courant synchronisant peut être considéré comme produit par la différence de potentiel $A_1 A_2$ résultant de e_1 et de e_2 .

» Pour de petites valeurs de δ_γ , ce courant synchronisant est en phase avec E_1 et sa valeur est donnée par l'expression

$$I_s = \frac{E_1}{Z_0} \delta_\gamma,$$

Z_0 étant la réactance de l'alternateur pour l'angle $\varphi + \gamma = 0$, c'est-à-dire pour un courant en phase avec E_1 .

» Le couple correspondant a pour valeur

$$C_s = C_0 \frac{E_1 \cos \gamma}{Z_1 I_0} \delta_\gamma.$$

» Et, en désignant par θ l'angle matériel correspondant à l'angle électrique $\delta_\gamma = p \theta$,

$$(3) \quad C_s = \frac{E_1 \cos \gamma}{Z_0 I_0} p C_0 \theta.$$

» Il est à remarquer que dans cette expression $\frac{E_1}{Z_0 I_0}$ ne représente pas du tout, comme on l'a souvent écrit avec une exactitude insuffisante, le rapport du courant de court circuit au courant de pleine charge (comme ce serait le cas si la réactance Z_0 pouvait être confondue avec la réaction d'induit de l'alternateur telle qu'on la déduit de la caractéristique en court circuit).

» Surtout pour les alternateurs à pôles saillants, la réactance du stator pour les courants correspondant à $\varphi + \gamma = 0$, réactance désignée par M. Blondel sous le nom de *réactance transversale*, est très différente de la réaction d'induit et ne dépend pas des mêmes facteurs.

» Cette réactance est celle qui correspond à l'importance des divers flux de fuite du stator, c'est-à-dire au flux produit par le

courant statorique qui n'intéresse pas la magnétisation du circuit inducteur.

» Comme on le sait, ce flux comprend :

» Les fuites autour de chaque encoche du stator ;

» Les flux de fuites autour des développements extérieurs des bobines du stator ;

» Les flux de fuites autour de l'ensemble de chaque bobine et se fermant par les pièces polaires et les intervalles d'air entre ces pièces.

» La réactance ainsi définie est toujours notablement inférieure à la réaction d'induit en court circuit. Elle peut être faible dans des machines ayant cependant un courant de circuit peu important, par exemple dans des alternateurs à faible entrefer mais à forte saturation de certaines parties du circuit magnétique.

» Par suite, l'erreur commise en remplaçant le rapport $\frac{E_1}{Z_0 I_0}$ par le rapport $\frac{I_{cc}}{I_0}$ du courant de court circuit au courant de pleine charge peut être importante et amener des surprises fâcheuses.

» Ceci dit, cherchons à déterminer la valeur du rapport $\frac{E_1 \cos \gamma}{Z_0 I_0}$ figurant dans l'expression du couple synchronisant.

» D'après la figure 1, on peut écrire (en négligeant la résistance du stator devant sa réactance)

$$(4) \quad E_1 \cos \gamma = U + Z_1 I_1 \sin \varphi.$$

» Par suite

$$\frac{E_1 \cos \gamma}{Z_0 I_0} = \frac{U}{Z_0 I_0} + \frac{Z_1}{Z_0} \frac{I_1 \sin \varphi}{I_0}.$$

$\frac{Z_0 I_0}{U}$ n'est autre chose que la proportion de réactance de l'alternateur pour le voltage U , proportion que nous désignerons par λ ; $\frac{I_1 \sin \varphi}{I_0}$ est la proportion de courant déwatté au courant de pleine charge au régime considéré de l'alternateur.

» Nous désignerons cette proportion par i' .

» $\frac{Z_1}{Z_0}$ est le rapport de la réactance de l'alternateur, pour la phase du courant correspondant au régime défini par l'angle $\varphi + \gamma$, à la valeur de cette réactance correspondant à $\varphi + \gamma = 0$.

» Nous désignerons ce rapport par la lettre μ .

» Nous aurons alors

$$\frac{E_1 \cos \gamma}{Z_0 I_0} = \frac{1}{\lambda} + \mu i'.$$

» Remarquons que, si l'on désire tenir compte de la résistance du stator, il suffit de remplacer dans l'équation (4) U par $U + RI \cos \varphi$.

» Si nous désignons par r la proportion de résistance du stator $= \frac{RI_0}{U}$ et par i le rapport $\frac{I_1 \cos \varphi}{I_0}$ du courant watté au courant de pleine charge, l'expression $\frac{E_1 \cos \gamma}{Z_0 I_0}$ deviendra alors

$$\frac{E_1 \cos \gamma}{Z_0 I_0} = \frac{1 + ri}{\lambda} + \mu i' \quad (1).$$

» Dans cette expression, le terme $\frac{1}{\lambda}$ qui a une valeur prépondérante est indépendant des conditions de charge pour un même voltage aux bornes. Mais il diminue avec ce voltage.

» Le terme $\frac{ri}{\lambda}$ est peu important, de telle sorte que l'expression $\frac{E_1 \cos \gamma}{Z_0 I_0}$ change donc peu avec la valeur de la charge.

» Quant au terme $\mu i'$, il varie avec les conditions du fonctionnement, à la fois parce que la réactance Z_1 , et par suite le coefficient μ , change avec l'angle $\varphi + \gamma$, et parce que le terme i' dépend essentiellement du facteur de puissance.

» Nous aurons pour ce terme variable deux limites en remarquant que le coefficient μ est supérieur à l'unité, mais est inférieur à la valeur qui serait obtenue en remplaçant la réactance Z_1 par la réaction d'induit en court circuit.

» On obtiendra ainsi pour le facteur $\frac{E_1 \cos \gamma}{Z_0 I_0}$ deux valeurs assez rapprochées pour les besoins du calcul.

» Nous désignerons, dans ce qui va suivre, ce facteur par la lettre K .

» L'équation (4) pourra alors s'écrire

$$(4') \quad C_s = K p C_0 \theta.$$

(1) Quand le groupe en question, au lieu d'être directement branché sur le réseau, lui est relié par une ligne possédant une certaine impédance, les coefficients μ et r doivent comprendre la proportion de résistance et de réactance de cette ligne.

» *Oscillations libres de l'alternateur couplé.* — Ces oscillations sont définies par l'équation différentielle

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = K p C_0 \theta = 0$$

dans laquelle J représente l'inertie des parties mobiles du groupe électrogène, et $K p C_0 \theta$ le couple synchronisant.

» Cette équation, bien connue, définit un mouvement oscillatoire de période

$$(5) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{K p C_0}}$$

» Cette expression peut se mettre sous une forme beaucoup plus favorable aux calculs et évitant mieux les chances d'erreur provenant d'un mauvais choix des unités.

» Multiplions par Ω^2 les deux membres de la fraction sous le radical. Nous aurons

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J \Omega^2}{\Omega C_0 \times p \Omega \times K}}$$

» Or, ΩC_0 n'est autre chose que la puissance de pleine charge W_0 , $\frac{J \Omega^2}{\Omega C_0}$ est donc la proportion, par unité de puissance du groupe, de force vive emmagasinée dans les parties mobiles de ce groupe

$$p \Omega = 2\pi f,$$

où f est la fréquence de l'alternateur.

» En remplaçant dans l'expression de T nous aurons donc

$$(6) \quad T = \sqrt{\frac{2\pi}{K}} \sqrt{\frac{J \Omega^2}{W_0}} \frac{1}{f}$$

» Le terme $\sqrt{\frac{2\pi}{K}}$ est un simple rapport numérique.

» Le terme $\frac{J \Omega^2}{W_0}$ est un temps T_0 .

» C'est le double du temps que mettrait l'application de la pleine charge pour amener le groupe électrogène à vide depuis la vitesse nulle jusqu'à sa vitesse de régime.

» Ce temps est sensiblement une constante pour les machines de même type et il est sensiblement indépendant de leur puissance.

» Pour les machines à pistons, il dépend principalement du coef-

ficient d'irrégularité durant un tour admis pour ces machines.

» Pour les turbines hydrauliques, il dépend, principalement, de la durée admise pour la fermeture de leurs vannages et de la variation de vitesse consentie en cas de variation brusque de la charge.

» Dans tous les cas, c'est une caractéristique mécanique du groupe électrogène.

» Quant au terme $\frac{1}{f}$, ce n'est autre chose que la durée t_0 d'une période des courants produits.

» L'équation (6) peut donc s'écrire sous la forme

$$(6') \quad T = \sqrt{\frac{2\pi}{K}} \sqrt{T_0 t^0}$$

qui en montre la parfaite homogénéité.

» Sous cette forme, on voit que la durée des oscillations libres (et nous avons vu qu'il y avait intérêt à augmenter le plus possible cette durée) est d'autant plus grande, toutes choses égales d'ailleurs :

» 1^o Que la fréquence est plus basse;

» 2^o Que le coefficient est plus faible, c'est-à-dire la réactance de l'alternateur plus grande;

» 3^o Que la force vive par cheval de puissance est plus considérable.

» On remarquera également que tous ces éléments entrent dans l'expression de T par leurs racines carrées, c'est-à-dire que, pour conserver à T sa même valeur, il faut :

» 1^o A la même fréquence, donner au rapport $\frac{T_0}{K}$ une valeur constante;

» 2^o Augmenter la valeur de ce rapport $\frac{T_0}{K}$ au fur et à mesure que la fréquence de fonctionnement est plus considérable.

» On remarquera enfin que le facteur K se modifie avec les conditions de fonctionnement de l'alternateur.

» En général, avec les alternateurs modernes, la valeur de K à pleine charge avec $\cos \varphi = 0,70$ est d'environ 30 à 50 pour 100 plus grande qu'à vide.

» Par suite, et il ne faut pas perdre de vue ce point, la périodicité des oscillations libres peut, dans certaines conditions de charge,

s'écarter de 15 à 20 pour 100 de la valeur qui correspondrait au fonctionnement à vide.

» *Oscillations forcées.* — La plupart des moteurs industriels (à l'exclusion des turbines à vapeur et des turbines hydrauliques) qui entrent dans la constitution des groupes électrogènes développent des couples périodiquement variables.

» Ce couple peut être considéré comme comprenant :

» 1^o Une partie constante correspondant au travail effectif;

» 2^o Une partie variable dont le travail durant un cycle entier est nul et pouvant se décomposer en harmoniques dont les périodicités sont des multiples supérieurs de la périodicité de ce cycle.

» Il est donc de la forme générale

$$C = C_m + \sum C_n \sin n \Omega t.$$

» Chacune des harmoniques donne lieu à des oscillations du groupe électrogène autour de sa position d'équilibre correspondant à l'action de la partie constante du couple.

» Ces oscillations se combinent et peuvent interférer entre elles pour donner lieu à un mouvement très complexe. Mais il suffit, en pratique, de s'assurer qu'aucune d'entre elles ne pourra prendre une amplitude dangereuse et, par suite, d'étudier séparément leurs actions.

» Désignons par :

ω la vitesse angulaire correspondant à la périodicité d'une de ces harmoniques;

C l'amplitude du couple correspondant.

» Ce couple sera défini à chaque instant t par l'expression

$$C \sin \omega t.$$

» D'autre part, si nous désignons par

$$\alpha = \Omega t + \theta$$

la position angulaire du groupe électrogène au moment considéré, nous aurons, pour définir le mouvement de ce groupe supposé fonctionnant isolément, l'équation

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = C \sin \omega t,$$

et comme

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \frac{d^2 \theta}{dt^2},$$

$$\text{donc } \frac{d^2 \theta}{dt^2} = C \sin \omega t.$$

» Cette équation définit un mouvement oscillatoire d'amplitude

$$(7) \quad \theta_0 = \frac{C}{\delta \omega^2}.$$

» Si, au lieu de supposer le groupe électrogène isolé, nous supposons l'alternateur couplé à un réseau de puissance infinie, nous aurons (en négligeant l'amortissement), pour définir son mouvement, l'équation différentielle

$$(8) \quad \delta \frac{d^2 \theta}{dt^2} + Kp C_0 \theta = C \sin \omega t.$$

» Elle définit un mouvement oscillatoire dont l'amplitude a pour valeur

$$(9) \quad \theta_1 = \frac{C}{\sqrt{(\delta \omega^2 - Kp C_0)^2}}.$$

» En divisant membre à membre les équations (7) et (9) il viendra

$$(10) \quad \frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{\delta \omega^2}{\sqrt{(\delta \omega^2 - Kp C_0)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{Kp C_0}{\delta \omega^2}\right)^2}}.$$

» Or, si nous désignons par $\omega_0 = \frac{T}{2\pi}$ la vitesse angulaire correspondant à la périodicité des oscillations libres de l'alternateur, nous avons vu [équation (5)] que

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{Kp C_0}{\delta}}.$$

» En remplaçant dans l'équation (10) nous aurons donc

$$(11) \quad \frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right)^2}}.$$

» L'amplitude des oscillations est donc modifiée par le couplage de l'alternateur.

» Pour les valeurs de ω_0 inférieures à ω elle est toujours augmentée et d'autant plus que le rapport $\frac{\omega_0}{\omega}$ est plus voisin de l'unité. Ce cas est le cas général.

» Pour $\omega = \omega_0$, c'est-à-dire s'il y avait résonance entre les deux périodicités, l'amplitude des oscillations augmenterait indéfiniment, abstraction faite de l'amortissement.

» Dès que la valeur de ω_0 dépasse ω , le rapport $\frac{\theta_1}{\theta_0}$ s'abaisse rapidement et il tombe au-dessous de l'unité quand $\frac{\omega_0}{\omega}$ est supérieur à $\sqrt{2}$.

» Ces résultats sont déjà bien connus et nous croyons inutile d'insister sur leur discussion.

» *Influence de l'amortissement.* — Dans ce qui précède nous avons négligé l'amortissement.

» Quand les conditions de fonctionnement voisinent la résonance, l'importance de l'amortissement devient très grande, car celui-ci intervient alors à peu près seul pour limiter l'amplitude des oscillations et rendre possible le fonctionnement en parallèle.

» En supposant, ce qui n'est guère éloigné de la vérité avec les circuits amortisseurs rationnellement établis, que l'amortissement est proportionnel à la vitesse de déplacement relatif des parties mobiles par rapport au champ tournant produit par les courants statoriques, le couple d'amortissement pourra se définir par l'expression

$$A \left(\frac{dz}{dt} - \Omega \right) = A \frac{d\theta}{dt}$$

et l'équation différentielle du mouvement devient

$$(12) \quad J \frac{d^2\theta}{dt^2} + A \frac{d\theta}{dt} + K p C_0 \theta = C \sin \omega t.$$

» L'amplitude de l'oscillation est alors

$$(13) \quad \theta_1 = \frac{C}{\sqrt{(A\omega)^2 + (J\omega^2 - KpC_0)^2}}$$

et à la résonance

$$(14) \quad \theta_1 = \frac{C}{A\omega}.$$

» Il est plus commode de définir le coefficient A par le rapport

du couple d'amortissement au couple de pleine charge pour une valeur déterminée du glissement.

» L'expression de A peut alors se mettre sous la forme

$$(15) \quad A g \frac{\Omega}{p} = C_0,$$

$g \frac{\Omega}{p}$ étant la vitesse de déplacement relatif qui donnerait lieu à un couple d'amortissement égal au couple de pleine charge.

» En remplaçant dans l'expression (14) celle-ci devient

$$(14') \quad \theta_1 = \frac{C}{C_0} g \frac{\Omega}{\omega_0}$$

et, par suite,

$$(16) \quad \frac{\theta_1}{\theta_0} = K g \frac{\Omega}{\omega_0}.$$

» Quand les conditions de résonance ne sont pas entièrement remplies, l'expression (16) devient

$$(17) \quad \frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0} \frac{\omega_0}{K g \Omega}\right)^2 - \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right)^2}}.$$

» De même, on a

$$(18) \quad \theta_1 = \frac{1}{K p} \frac{C}{C_0} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{K g \Omega}\right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1\right)^2}}.$$

» Il est intéressant de faire ressortir l'importance relative des échanges de puissance qui se produisent entre un alternateur et le réseau auquel il est couplé, durant les diverses oscillations envisagées ci-dessus.

» C'est l'importance de ces échanges qui limite, en effet, la possibilité de la marche en parallèle.

» L'importance relative de la puissance échangée par rapport à la puissance de pleine charge peut se représenter par

$$\frac{\Delta W_\gamma}{W_0}.$$

Or

$$W_0 = UI_0,$$

$$\Delta W_\gamma = \frac{UE_1 \cos \gamma}{Z_0} d\gamma.$$

» Par suite

$$\frac{\Delta W_Y}{W_0} = \frac{E_1 \cos \gamma}{Z_0 I_0} d\gamma = K p \theta_1.$$

D'où l'on tire

$$(19) \quad \frac{\Delta W_Y}{W_0} = K p \theta_1 = \frac{\frac{C}{C_0}}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{K g \Omega}\right)^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1\right)^2}}$$

et à la résonance

$$(19') \quad K p \theta_1 = \frac{C}{C_0} \frac{K g \Omega}{\omega_0}.$$

» *Cas du couplage de deux groupes de puissance finie.* — Dans tout ce qui précède, nous n'avons envisagé que le cas d'un groupe électrogène accouplé à un réseau de puissance infinie.

» Examinons ce que deviennent les résultats trouvés dans les cas qui se rencontrent véritablement dans la pratique, c'est-à-dire quand il s'agit de la marche en parallèle de deux groupes électrogènes de puissance comparable.

» Pour plus de simplicité, nous nous bornerons à envisager le cas de la marche à vide.

» Dans la position d'équilibre, les forces électromotrices induites dans les deux alternateurs concorderont en phase.

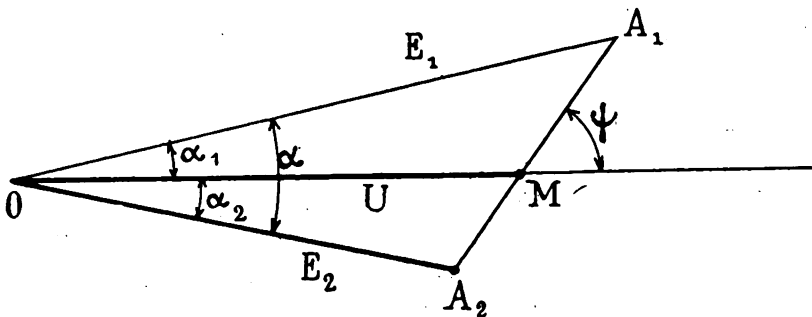


Fig. 2.

» Supposons ceux-ci écartés de cette position d'équilibre et désignons par α_1 et α_2 la valeur des angles que feront les vecteurs représentant leurs forces électromotrices induites avec le vecteur représentant la différence de potentiel à leurs bornes.

» Si nous construisons le diagramme de ces différentes forces électromotrices, nous aurons celui représenté par la figure 2.

» Dans ce diagramme :

OA_1 représente en grandeur et en phase la force électromotrice E_1 ;

OA_2 représente E_2 ;

U , la différence de potentiel aux bornes ;

A_1, A_2 la résultante de E_1 et E_2 ;

ϕ le décalage de A_1, A_2 par rapport à U .

» Désignons par :

Z_1 et Z_2 les réactances des stators des deux alternateurs ;

p_1 et p_2 leurs nombres de paires de pôles ;

C_1 et C_2 les valeurs respectives de leurs couples de pleine charge ;

I_1 et I_2 les valeurs correspondantes des courants de pleine charge ;

$\mathfrak{J}_1$ et $\mathfrak{J}_2$ les inerties des parties mobiles.

» En négligeant la résistance des stators vis-à-vis de leur réactance, le courant de circulation sera décalé de $\frac{\pi}{2} - \psi$ par rapport à U et sa composante en phase avec U , pour de petites valeurs de α_1 et α_2 , aura pour valeur

$$U \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{Z_1 + Z_2}.$$

» Le couple synchronisant agissant sur le premier groupe électrogène aura par suite pour expression

$$C_{s_1} = C_1 \frac{U}{I_1(Z_1 + Z_2)} (\alpha_1 + \alpha_2).$$

» De même, le couple synchronisant agissant sur le second groupe électrogène aura pour expression

$$C_{s_2} = C_2 \frac{U}{I_2(Z_1 + Z_2)} (\alpha_1 + \alpha_2).$$

» Les équations différentielles représentant les mouvements de chacun des deux groupes pourront s'écrire :

» Pour le premier groupe,

$$\frac{\mathfrak{J}_1}{p_1} \frac{d^2 \alpha_1}{dt^2} + \frac{C_1 U}{I_1(Z_1 + Z_2)} (\alpha_1 + \alpha_2) = 0.$$

» Pour le second,

$$\frac{\mathfrak{J}_2}{p_2} \frac{d^2 \alpha_2}{dt^2} + \frac{C_2 U}{I_2(Z_1 + Z_2)} (\alpha_1 + \alpha_2) = 0.$$

» En ajoutant membre ces deux égalités, après les avoir divisées respectivement par $\frac{\beta_1}{p_1}$ et $\frac{\beta_2}{p_2}$, il viendra

$$\frac{d^2\alpha_1}{dt^2} + \frac{d^2\alpha_2}{dt^2} + (\alpha_1 + \alpha_2) \left[\frac{p_1 C_1 U_1}{I_1(Z_1 + Z_2)\beta_1} + \frac{p_2 C_2 U}{I_2(Z_1 + Z_2)\beta_2} \right] = 0$$

et en posant $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$

$$(20) \quad \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \alpha \left[\frac{p_1 C_1 U}{I_1(Z_1 + Z_2)\beta_1} + \frac{p_2 C_2 U}{I_2(Z_1 + Z_2)\beta_2} \right] = 0.$$

» Or, si nous désignons par T_1 et T_2 les durées des périodes d'oscillations propres de chacun de ces groupes (supposés couplés à un réseau infini), nous avons vu dans la première partie de notre travail que l'on avait

$$T_1 = 4\pi^2 \frac{\beta_1 Z_1 I_1}{p_1 C_1 U},$$

$$T_2 = 4\pi^2 \frac{\beta_2 Z_2 I_2}{p_2 C_2 U}.$$

» En remplaçant dans l'équation (20) celle-ci deviendra

$$(20') \quad \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{4\pi^2}{Z_1 + Z_2} \left(\frac{Z_1}{T_1^2} + \frac{Z_2}{T_2^2} \right) \alpha = 0.$$

» C'est l'équation d'un mouvement oscillatoire dont la période possède une durée T donnée par l'égalité

$$(21) \quad T = \sqrt{\frac{T_1^2 T_2^2 (Z_1 + Z_2)}{Z_1 T_2^2 + Z_2 T_1^2}}.$$

» Ainsi que l'on pouvait s'y attendre, cette expression est parfaitement symétrique par rapport aux données des deux groupes.

» Si les deux groupes électrogènes sont identiques, c'est-à-dire si l'on a

$$T_1 = T_2,$$

$$Z_1 = Z_2,$$

cette équation donne

$$T = T_1.$$

» C'est-à-dire que (contrairement à ce qui a été parfois énoncé) la période d'oscillation de deux groupes identiques couplés entre eux est la même que s'ils étaient séparément couplés à un réseau de puissance infinie.

» Ce dernier cas se trouve réalisé quand on fait $Z_2 = 0$ dans l'équation (2).

» Il est facile de constater qu'elle donne alors

$$T = T_1.$$

» Pour étudier plus facilement le cas où les deux groupes sont de puissances et de caractéristiques différentes, posons

$$Z_2 = m Z_1.$$

» L'équation (21) deviendra alors

$$T = \sqrt{\frac{T_1^2 T_2^2 (1 + m)}{m T_1^2 + T_2^2}}.$$

» Quand m est petit, c'est-à-dire quand le second groupe est très puissant par rapport au premier, T tend vers T_1 , c'est-à-dire que la période d'oscillation de l'ensemble des deux groupes tend vers celle du premier.

» Quand m est grand, c'est-à-dire quand le second groupe est faible par rapport au premier, T tend vers T_2 , c'est-à-dire que la période d'oscillation de l'ensemble des deux groupes tend vers celle du second.

» En un mot, le plus petit des deux groupes est celui qui tendra à imposer sa période d'oscillation.

» Remarquons, d'autre part, que des équations précédentes résulte l'égalité

$$\frac{\alpha_1}{\alpha} = \frac{\frac{Z_1}{T_1}}{\frac{Z_1}{T_1} + \frac{Z_2}{T_2}}.$$

» En portant dans l'expression du couple synchronisant C_s , celle-ci devient, toutes simplifications effectuées,

$$C_{s_1} = K_1 \frac{1 + \frac{Z_2}{Z_1} \frac{T_2}{T_1}}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} p_1 C_1 \theta_1 = \frac{1 + m \frac{T_2}{T_1}}{1 + m} K_1 p_1 C_1 \theta_1.$$

» On pourra donc traiter tous les cas envisagés pour le groupe couplé sur réseau infini en remplaçant le coefficient K tel qu'il a été défini dans la première partie de ce travail par

un coefficient représenté par l'expression

$$K = K_1 \frac{1 + m \frac{T_2}{T_1}}{1 + m},$$

laquelle tient compte des caractéristiques des deux groupes couplés.

» *Applications numériques.* — Pour bien matérialiser les résultats auxquels nous sommes arrivés ci-dessus, faisons une application numérique à un cas déterminé.

» Supposons couplés en parallèle deux groupes électrogènes actionnés par des moteurs à combustion interne, à 4 cylindres, du type à 4 temps et tournant à 150 tours par minute.

» Nous admettons que : *a.* Les caractéristiques électriques de l'alternateur soient définies par :

$$\lambda = 0,25,$$

$$r = 0,02,$$

$$\mu \text{ (valeur maxima)} = 2,$$

$g = 0,25$ (correspondant à un amortissement tel que le couple développé soit de 10 pour 100 du couple de pleine charge pour un glissement de 2,5 pour 100).

» Il en résulte, pour le coefficient K , les valeurs extrêmes suivantes :

$$\text{à vide, } K = 4,$$

$$\text{à pleine charge avec } \cos \varphi = 0,71, \quad K = 5,5,$$

» *b.* L'inertie des parties mobiles du groupe électrogène soit telle que la périodicité de ses oscillations libres soit, à vide, de 1 par seconde.

» 1° Avec le moteur considéré, l'harmonique principale du couple moteur sera celle correspondant à la fréquence des impulsions motrices, lesquelles sont au nombre de deux par tour.

» Nous admettons que l'amplitude de cette harmonique est définie par la relation

$$\frac{C}{C_0} = 0,7,$$

laquelle représente à peu près le maximum qu'elle puisse admettre

» Nous aurons pour les conditions extrêmes de la recharge les résultats suivants :

Valeurs de	Marche à vide.	Marche à pleine charge avec $\cos \varphi = 0,71$.
$\frac{\omega_0}{\omega}$	0,2	0,235
$\frac{\theta_1}{\theta_0}$	1,04	1,05
$Kp\theta_1$	0,03	0,058

» 2° En dehors de l'harmonique principale il y a lieu d'envisager une harmonique de fréquence beaucoup plus basse correspondant à une inégalité des impulsions motrices dans les différents cylindres résultant d'inégalités difficiles à éviter dans les injections de fluides combustibles et dans la combustion.

- » La fréquence de cette harmonique sera celle même du cycle.
 » On aura donc

$$\frac{\omega}{\Omega} = 0,5.$$

» Nous admettrons que son amplitude soit définie par

$$\frac{C}{C_0} = 0,05.$$

» Nous aurons à vide et à pleine charge les résultats suivants :

Valeurs de	Marche à vide.	Marche à pleine charge avec $\cos \varphi = 0,71$.
$\frac{\omega_0}{\omega}$	0,8	0,94
$\frac{\theta_1}{\theta_0}$	2,1	3,40
$Kp\theta_1$	0,065	0,13

» La marche en parallèle sera encore acceptable. Mais, si toutes autres choses demeurant les mêmes, nous supposons l'amortissement réduit de telle façon que la valeur de g s'élève de 0,25 à 1, c'est-à-dire que l'amortissement soit réduit au quart de sa valeur première, les résultats deviendront les suivants :

Valeurs de	Marche à vide.	Marche à pleine charge avec $\cos \varphi = 0,71$.
$\frac{\omega_0}{\omega}$	0,8	0,94
$\frac{\theta_1}{\theta_0}$	2,7	7,1
$Kp\theta_1$	0,085	0,33

» La marche en parallèle deviendra défectueuse aux charges inductives du fait de l'amplitude des oscillations car celle-ci, par interférence avec celles dues à l'harmonique principale, donneront lieu à des échanges de puissance atteignant près de 40 pour 100 de la puissance de pleine charge.

» *Constitution à donner aux groupes électrogènes.* — Pour être dans de bonnes conditions de marche en parallèle, il faut constituer les groupes électrogènes de telle sorte que leurs oscillations libres aient une périodicité plus basse que celle des plus basses harmoniques du couple moteur.

» Nous remarquerons que les alternateurs à grande réactance se prêtent plus facilement à l'abaissement de la périodicité des oscillations libres et par suite à la réalisation des conditions de bonne marche en parallèle.

» Or, d'autre part, l'augmentation de la réactance influe favorablement sur les dimensions et sur le coût de l'alternateur et sur la réduction des effets destructeurs des courts circuits.

» Comme l'emploi des régulateurs de potentiel à action rapide fait maintenant disparaître le seul avantage que présentait, au point de vue de la régulation du voltage, l'emploi de machines à faible réactance, puisqu'ils fournissent pour cette régulation une solution entièrement satisfaisante et indépendante des caractéristiques électriques de l'alternateur, il en résulte qu'il y a tout intérêt, contrairement à la pratique longtemps en honneur, à augmenter la valeur de cette réactance autant que cela est conciliable avec l'aptitude à supporter les surcharges brusques que l'on doit réserver au groupe électrogène.

» Examinons quelles sont avec les moteurs usuels les fréquences qu'il convient d'envisager pour les harmoniques du couple moteur.

» Nous remarquerons, tout d'abord, que plus est brève la période du cycle décrit par le moteur, plus les conditions de bonne marche en parallèle deviennent faciles à réaliser.

» Par conséquent, les machines à grande vitesse de rotation seront mieux placées sous ce rapport que les machines à rotation lente et pourront se suffire de volants beaucoup moins lourds.

» Les moteurs à couple périodiquement variable entrant dans la constitution des groupes électrogènes comprennent essentiellement :

- » Les moteurs à vapeur à double effet;
- » Les moteurs à combustion interne.

» *Moteurs à vapeur.* — Les moteurs à vapeur généralement employés dans les stations centrales sont des moteurs à vitesse lente, types Corliss, à soupapes ou à distribution par pistons valves.

» Les vitesses de rotation de ces moteurs sont généralement comprises entre :

- » 125 tours par minute pour les petites puissances ;
- » 75 tours par minute pour les plus grandes.

» La plus basse fréquence des harmoniques du couple moteur correspond à l'obliquité des bielles et à l'inégalité des efforts sur les deux faces du piston. Sa période correspond à la durée d'un tour.

» Remarquons que cette fréquence est la même, que le moteur soit monocylindrique, compound-tendeur, compound-parallèle ou à triple expansion. Seule l'amplitude relative de l'harmonique varie suivant le nombre de manivelles et le plus ou moins bon partage de la charge entre elles.

» Par conséquent, pour cette catégorie de machines motrices, la plus basse fréquence des harmoniques du couple moteur est comprise entre :

- » $\frac{125}{60} = 2,08$ par seconde pour les machines à 125 tours ;
- » $\frac{75}{60} = 1,25$ par seconde pour les machines à 75 tours.

» *Moteurs à combustion interne.* — Ces moteurs (moteurs à gaz ou moteurs Diesel) sont du cycle à 2 temps ou du cycle à 4 temps.

» Dans le premier cas la durée du cycle est celle d'un tour. C'est aussi celle de l'harmonique de fréquence la plus basse qu'il convienne d'envisager.

» Les moteurs à 2 temps, qui sont généralement de grande puissance, tournent à des vitesses qui ne dépassent pas 150 tours par minute et s'abaissent jusqu'à 100 tours.

» La fréquence des harmoniques correspondantes est de :

- » $\frac{150}{60} = 2,5$ par seconde pour les plus rapides ;
- » $\frac{100}{60} = 1,67$ par seconde pour les plus lentes.

» Pour les moteurs à 4 temps, la fréquence la plus basse à envi-

sager est toujours celle d'un cycle, mais celui-ci se prolonge durant deux tours complets.

» La vitesse de ces moteurs est généralement supérieure à 150 tours par minute. Toutefois, il y a tendance à employer les moteurs Diesel 4 temps pour des puissances de plus en plus grandes et certains constructeurs en ont abaissé la vitesse à 125 tours.

» La fréquence des harmoniques à considérer est supérieure à $\frac{150}{2 \times 60} = 1,25$ par seconde pour les moteurs à vitesse supérieure à 150 tours.

» Elle s'abaisse à $\frac{125}{2 \times 60} = 1,04$ par seconde pour les moteurs à 125 tours.

» Pour tous ces moteurs, qu'ils soient à 2 temps ou à 4 temps, il y a lieu d'envisager la possibilité de cette harmonique quel que soit le nombre des cylindres moteurs, car il est prudent de toujours compter, surtout avec les moteurs à gaz, sur une différence dans la combustion et la puissance développée dans les différents cylindres.

» Seule l'amplitude relative de l'harmonique diminue très rapidement avec le nombre des cylindres.

» D'après ce qui précède, on voit que pour se trouver, dans la généralité des cas, dans des conditions satisfaisantes, il conviendra d'adopter, pour les groupes électrogènes à 50 périodes actionnés par moteurs à pistons, une périodicité des oscillations libres inférieure à l'unité.

» Cette périodicité n'est pas trop difficile à obtenir même avec des alternateurs à 50 périodes et elle n'exige pas des poids de volant exagérés.

» Nous avons vu que la durée des oscillations libres était donnée par l'équation

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi}{f}} \sqrt{\frac{1}{K} \frac{3\Omega^2}{W_0}}.$$

» Pour $f = 50$ et $T = 1$, on obtient pour la force vive par unité de puissance

$$\frac{3\Omega^2}{W_0} = 8 K.$$

» Ou bien si nous exprimons $3\Omega^2$ en mètres carrés-kilogrammes et W_0 en chevaux

$$\frac{3\Omega^2}{W_0} = 600 K.$$

» Admettons pour K à vide la valeur $K = 3,5$ qui est admissible.

» Il en résultera la nécessité d'une force vive par cheval de puissance du groupe de 2100 kg².

» Avec des volants en acier coulé tournant à des vitesses périphériques de 40 m, cette force vive peut s'obtenir avec un poids de volant par cheval de 16 à 18 kg, ce qui n'a rien d'exagéré.

» Avec des volants en fonte dont la vitesse périphérique est limitée à 30 m, le poids augmente beaucoup et devrait atteindre près de 30 kg par cheval.

» Si tous les groupes électrogènes susceptibles de fonctionner ensemble en parallèle étaient établis dans ces conditions, il ne serait en général pas indispensable d'employer des circuits amortisseurs.

» Mais la situation se modifie quand on doit envisager la marche en parallèle de ces groupes électrogènes (principalement du type à combustion interne 4 temps) avec d'autres groupes possédant des durées moindres d'oscillations libres, tels par exemple que des groupes à marche rapide et volants légers ou des groupes turbo-alternateurs.

» Pour parer à toute éventualité de ce genre, il sera donc toujours de bonne prudence de munir les alternateurs d'un circuit amortisseur énergique pouvant correspondre à des valeurs de $g = 0,20$ à $0,30$.

» On pourra alors se considérer comme à peu près à l'abri de toute surprise fâcheuse.

» Des amortisseurs insuffisants ne sont d'aucune utilité car ils compliquent la construction sans donner de résultats efficaces.

» *Groupes électrogènes actionnés par turbines.* — Avec les turbines hydrauliques, la force vive par cheval du groupe électrogène est généralement déterminée par les garanties de variation de vitesse en cas de décharge brusque.

» Si nous désignons par :

t le temps de fermeture du vannage ;

ε l'écart de vitesse admis au moment d'une décharge ;

ρ la fraction de variation de charge correspondante ;

la valeur de $\frac{\partial \Omega^2}{W_0}$ se déduit de la relation

$$\frac{\partial \Omega^2}{W_0} = \frac{\rho t}{(1 + \varepsilon)^2 - 1}.$$

» Pour

$$\begin{aligned}\rho &= 0,5, \\ t &= 2 \text{ secondes}, \\ \varepsilon &= 0,06,\end{aligned}$$

chiffres généralement admis en pratique, on trouve

$$\frac{\Delta \Omega^2}{W_0} = 8,5.$$

» Si, d'autre part, nous admettons pour l'alternateur une valeur de $K = 3,5$, le calcul montre que la périodicité des oscillations libres pour un groupe à 50 périodes sera d'environ 1,8 par seconde.

» Pour les groupes turbo-alternateurs à vapeur, leur force vive par cheval résulte de leur construction et ne peut guère être modifiée.

» Pour des groupes tournant à 3000 tours par minute qui sont les plus employés, on est généralement conduit à une périodicité d'oscillation libre avoisinant 1,7 à 1,8 par seconde.

» D'une manière générale, on peut considérer que la périodicité des oscillations libres des groupes turbo-alternateurs à vapeur ou hydrauliques et pour fréquence de 50 périodes restera comprise entre les limites 1,5 et 2 par seconde.

» *Moteurs synchrones et commutatrices.* — Ces appareils et surtout les commutatrices possèdent une force vive beaucoup moindre par unité de puissance que les groupes électrogènes. Leurs périodicités d'oscillations sont donc beaucoup plus élevées et peuvent facilement entrer en résonance non seulement avec les plus basses harmoniques du couple moteur, mais même avec les harmoniques les plus élevées.

» Aussi est-il toujours recommandable de munir ces appareils d'un circuit amortisseur très énergique, lequel offre d'ailleurs l'avantage de faciliter leur démarrage.

» Ce sera la meilleure sauvegarde pour le bon fonctionnement de ces appareils en toutes circonstances.

» *Usine de La Rochelle.* — Les résultats constatés dans le fonctionnement en parallèle des groupes électrogènes de la station de La Rochelle offrent un exemple remarquable d'application des considérations exposées ci-dessus et qui mérite d'être rapporté. Cette usine contenait à l'origine deux groupes électrogènes actionnés par moteurs à gaz pauvre du type à 4 temps à 2 cylindres

à double effet, tournant à 150 tours. Il y avait donc deux impulsions motrices par tour, mais les deux cylindres étant alimentés par gazogènes différents et ne fonctionnant pas dans les deux sens dans des conditions identiques, il en résultait fatalement une inégalité dans les quatre impulsions motrices d'un cycle.

» On devait donc s'attendre à voir se manifester l'harmonique de périodicité $\frac{150}{2 \times 60} = 1,25$ par seconde.

» L'alternateur d'une puissance de 250 kw était bobiné pour 8000 volts, 50 périodes et était muni d'un volant donnant une valeur de PD^2 140 000 kgm^2 , valeur très considérable pour un moteur de cette puissance. Le poids de ce volant dépassait, en effet, 37 kg par cheval.

» Conformément aux idées de l'époque, ces alternateurs destinés à un service d'éclairage avaient une très faible réaction d'induit et le rapport $\frac{I_{cc}}{I_0}$ au voltage de 8000 volts était supérieur à 5.

» La périodicité des oscillations libres devait être donnée par l'expression

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{n} \sqrt{K \left(\frac{f}{2\pi} \frac{W_0}{PD^2} \right)} = 0,48 \sqrt{K}.$$

» Avec une valeur de K correspondant à $K = \frac{I_{cc}}{I_0}$ on aurait eu $\frac{1}{T} = 1,1$ correspondant à une durée d'oscillation assez éloignée de celle qui aurait produit la résonance avec l'harmonique 1,25 pour permettre une marche acceptable.

» Mais en réalité la valeur du coefficient K , à vide, s'est trouvée voisine de 7 et il en est résulté une valeur de $\frac{1}{T}$ donnée par

$$\frac{1}{T} = 0,48 \sqrt{7} = 1,28,$$

valeur très voisine de l'harmonique 1,25.

» Aussi l'expérience montra-t-elle l'impossibilité de faire fonctionner ces alternateurs en parallèle au voltage de 8000 volts.

» Pour obtenir une marche acceptable, il fallut pousser l'excitation jusqu'à réaliser un voltage compris entre 9000 et 9500 volts; la stabilité suffisante à vide s'améliorait alors avec la charge. A ce voltage correspondait une valeur du coefficient K voisine de 9; d'où résultait, à vide,

$$\frac{1}{T} = 0,48 \sqrt{9} = 1,44.$$

» En charge, cette périodicité augmentait un peu, s'éloignant par suite davantage de la résonance.

» Le fonctionnement en parallèle, quoique acceptable, donnait lieu à des oscillations marquées avec des battements de l'ampèremètre qui présentaient des maxima espacés d'environ 3 secondes et demie à 4 secondes.

» Ces maxima provenaient évidemment d'interférences entre les périodicités des oscillations libres et celles des pulsations motrices.

» La périodicité des premières pouvait donc s'en déduire par la relation

$$\frac{1}{T} - 1,25 + \frac{1}{4} = 1,50$$

voisine de celle correspondant au calcul.

» A la suite de ces essais, les bobinages de ces alternateurs furent modifiés de manière à les faire fonctionner dans la région de la caractéristique correspondant au voltage de 9300 volts et à une valeur du coefficient K comprise entre 9 et 10, c'est-à-dire avec une périodicité d'oscillation libre assez éloignée mais *supérieure* à celle de l'harmonique 1,25.

» Ultérieurement deux groupes électrogènes furent ajoutés à cette usine.

» Le premier de 175 kw était actionné par un moteur Diesel, 4 cylindres, 4 temps, tournant à 300 tours. Le coefficient K de l'alternateur ne dépassait pas 5 et la valeur de PD^2 était réduite à 9200 kgm².

» Il en résultait une valeur de $\frac{1}{T}$ donnée par

$$\frac{1}{T} = 0,2 \sqrt{\frac{50}{2\pi} \frac{15500}{9200} \times 5} = 1,77$$

par suite très supérieure à 1,25.

» Cet alternateur fonctionna convenablement en parallèle avec les moteurs à gaz; il avait été fourni par le même constructeur qui avait déjà fourni ceux de ces moteurs.

» Le second groupe de 500 kw était actionné par un moteur Diesel 3 cylindres, 2 temps, tournant à 150 tours. L'alternateur (fourni par un constructeur différent qui en avait garanti la bonne marche en parallèle avec les premiers, sous la seule conditions que ceux-ci fonctionnaient bien en parallèle entre eux), était du type volant et possédait une valeur de PD^2 220 000 kgm² avec un coefficient $K = 3,3$.

» La périodicité des oscillations libres, à vide, devait être

$$\frac{1}{T} + 0,4 \sqrt{\frac{50}{2\pi} \frac{50000}{220000}} \times 3,3 = 0,96.$$

» Cet alternateur fonctionna bien en parallèle avec le petit groupe de 175 kw, mais ne put jamais fonctionner avec les moteurs à gaz.

» Cela provenait évidemment de ce que leur périodicité combinée comprise entre 0,96 et 1,44 était trop voisine de l'harmonique 1,25.

» En outre, cet alternateur ne possédait aucun circuit amortisseur.

» Il fut ultérieurement ajouté deux autres groupes électrogènes Diesel 4 temps, 4 cylindres de 500 kw tournant à 214 tours dont le PD^2 et le coefficient K furent calculés pour donner une périodicité d'oscillation libre voisine de l'unité. Ces groupes furent, en outre, munis d'amortisseurs énergiques.

» La marche en parallèle eut lieu dans des conditions parfaites et sans aucun incident avec les deux groupes Diesel déjà installés. Comme on pouvait s'y attendre, elle fut défectueuse avec les moteurs à gaz et ceux-ci durent être finalement supprimés. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. de Marchena.

L'AVENIR DE L'INDUSTRIE ÉLECTRIQUE EN ROUMANIE.

M. HURMUZESCU. — « Les applications de l'électricité deviennent de plus en plus nombreuses et importantes et l'on assiste à une véritable invasion de l'énergie électrique dans tous les domaines industriels; ainsi on peut dire que le développement industriel d'un pays, et d'une manière générale tout son développement économique est commandé par le niveau de son industrie électrique. En retour, on ne peut pas considérer ni prévoir les progrès futurs de cette industrie sans analyser l'état présent du pays, ses éléments de richesse et son avenir économique.

» Aussi, pour répondre au titre de cette communication, est-il indispensable de faire connaître sommairement l'essor économique de la Roumanie pendant les dernières années d'avant la guerre.

» L'histoire de la nation roumaine depuis les premières années de sa formation c'est l'histoire des luttes âpres qu'elle eut à soutenir sans cesse pour défendre son sol et son existence. Sa situation géographique et la richesse de son sol l'ont exposée spécialement à toutes les invasions barbares et aux convoitises de ses voisins. Seule de race latine, étouffée presque par les empires de proie slaves et mongols qui l'entouraient, elle eut trop peu de répit pour le développement des qualités civilisatrices de sa race, quoique, comme dit, vers 1838, Vaillant, grand ami et admirateur des Roumains : « *Ce peuple qui chaque fois qu'il a pu prendre haleine a* » *témoigné de sa soif des progrès de l'intelligence, etc.* »

» Cette reprise de souffle, ces moments d'accalmie, du commencement du siècle dernier, ont permis enfin à la Roumanie une vie d'activité sociale, intellectuelle et économique plus intense; dans les dernières années surtout l'essor en fut considérable.

» En 1829 les Dardanelles devenant libres par le traité d'Andrinople, les bateaux purent venir prendre nos produits, surtout des céréales, dans nos ports de Braïla et de Galatzi, ce qui favorisa considérablement la production.

» Enfin après la guerre de 1877-1878 la Roumanie gagne avec l'indépendance politique son ancienne province transdanubienne, avec le port de Constantza à la mer Noire.

» Grâce à cette issue à la mer, l'exportation pouvant se faire pendant toute l'année sans être interrompue par les rigueurs de

l'hiver, comme cela arrive pour les ports danubiens, l'activité agricole prend une grande intensité.

» L'étendue des cultures en 1913 dépasse 7 000 000 ha dont 2 000 000 ha de blé.

» D'après les tableaux comparatifs, la Roumanie, de tous les pays de l'Europe, possède, relativement à toute sa surface cultivée, la plus grande culture de blé. Et elle en produit de très bonne qualité, surtout en Moldavie.

» Sa production en 1913 a été de plus de 31 000 000 hl.

» Il faut dire aussi que de cette quantité la consommation intérieure n'utilise qu'une faible partie, la population de la campagne préférant pour sa nourriture la farine de maïs.

» L'évaluation des récoltes, d'après le Bulletin statistique de cette année (1913), donne un total de 1 260 000 000 fr.

» Etant donnée l'importance actuelle de ces produits et leurs prix, cela vaudrait au moins quatre fois plus.

» *Le pétrole.* — Après les céréales la richesse la plus importante de la Roumanie c'est le pétrole dont la production, en 1913, était de 1 885 225 tonnes, notre pays étant le quatrième des pays producteurs.

» On a exporté dans la même année

428 098 tonnes de pétrole raffiné,	
241 726	» benzine,
377 688	» résidus,
664	» paraffine.

La France étant notre meilleur client pour ce produit.

» *L'augmentation de l'export.* — Pour nous rendre compte de l'énorme progrès réalisé par notre état économique, nous allons montrer le chiffre de notre exportation de 1913, année de calme, qui monte à 670 705 335 fr.

» Dans cette somme les céréales et leurs dérivées figurent pour 448 412 269 fr, et en le comparant aux chiffres de notre export de l'année 1830, lequel se réduisait à cette époque à

2 700 000 lei de céréales,	
3 250 000	» sel,
2 532 000	» bétail,

on constate, donc que le progrès est assez rapide et à juste titre nous donne de grands espoirs pour l'avenir.

» *L'industrie.* — L'activité industrielle qui a suivi est de date encore plus récente, car avant 1875 elle était empêchée par la convention très onéreuse que l'Autriche-Hongrie nous avait imposée.

» Ce n'est qu'après la loi de 1887, pour l'encouragement de notre industrie nationale, que le mouvement industriel devient plus important. Enfin la nouvelle loi de 1912 accorda de nouveaux avantages. Ainsi en moins de 25 ans elle prend un rapide développement et arrive à un capital investi de plus de 500 000 000 fr, travaillant chaque année pour plus de 400 000 000 fr de matières premières.

» Parmi les plus prospères on peut citer celles qui concernent les produits agricoles, les pétroles, les textiles, les bois, la cellulose, le papier, etc.

» *Balance commerciale.* — Pendant les dix dernières années, le chiffre de l'export a dépassé toujours l'import.

» La prospérité économique était dénotée aussi par l'accroissement continu des dépôts dans les caisses d'économie et dans les différentes banques,

» *Le budget de l'État.* — Dans le même intervalle de temps de 25 ans le budget de l'État, qui était monté d'une manière lente et régulière vers le chiffre de 200 000 000 fr, éprouva une ascension beaucoup plus rapide, pour monter en 1916 à 645 719 300 fr.

» Et il faut savoir que le contribuable roumain supportait une charge moitié moins grande que celle imposée au contribuable français.

» *Les excédents.* — Pendant la série d'années prospères nous avons eu à enregistrer des excédents budgétaires notables allant pour une des années jusqu'à 90 000 000 fr.

» *Les grands travaux.* — Cette grande prospérité se traduit et se développe par un nombre considérable de travaux d'utilité publique, travaux d'art et de constructions.

» Trois de ces travaux doivent retenir quelques minutes notre attention.

» 1^o *Le pont sur le Danube.* — Fetesti-Cerna-Vode, sur lequel M. A. Muzet, ingénieur français, s'exprime ainsi : « *Cet important ouvrage d'art, un des plus grands d'Europe, mesurant 28 km, a été construit par la Société française Fives-Lille. La partie*

» principale, entièrement métallique, a 750 m de longueur et correspond au bras le plus large du fleuve. L'autre partie importante du pont, également métallique, a 420 m et correspond à ~~un~~ autre bras du Danube.

» Ces deux ponts sont reliés ensemble par deux viaducs, l'un de 990 m, l'autre de 650 m et une digue de pierre qui traverse tout le terrain marécageux. La construction de ce mastodonte a duré 10 ans et a coûté 34 millions. »

» 2° *L'agrandissement du port de Constantza.* — Lorsque nous prîmes possession de la Dobroudja, le port de Constantza ne présentait qu'un intérêt commercial très peu important, avait un trafic très faible, possédait un seul quai.

» Depuis, les travaux exécutés et ceux qui sont en cours l'ont complètement transformé en un grand port moderne prévu avec des quais pour le chargement des céréales, des quais pour les pétroles et pour d'autres marchandises.

» On y a introduit toutes les installations nécessaires et les machines spéciales pour la manutention de ces produits.

» Les magasins pour les céréales peuvent contenir jusqu'à 140 000 tonnes dans les mille silos existants et l'on doit en construire d'autres.

» Le chargement dans le silo et le déchargement se font automatiquement par des machines commandées à distance.

» Le mécanisme s'accomplit à l'aide des élévateurs, bandes, balances à peser, trémies, tubes télescopiques mis en mouvement par des électromoteurs.

» Les quais ont une surface de 100 ha avec 60 km de voie ferrée; les bassins ont une étendue de 80 ha pouvant contenir 50 bateaux de 5000 tonnes chaque.

» Les travaux auront coûté plusieurs centaines de millions de francs. Pour le développement futur de la nouvelle Roumanie, on doit prévoir un second port à la mer Noire, car celui-ci sera insuffisant.

» 3° *Les conduites spéciales de pétrole.* — Construites pour pouvoir envoyer directement, jusque dans les réservoirs du port de Constantza, le pétrole brut de l'endroit même de son extraction et des usines de rectification.

» C'est un travail de la plus grande importance, simplifiant la question du transport de ce produit sur une distance de 200 km et déchargeant d'autant le service du chemin de fer.

» Avec les trois conduites dans toute la longueur, les pompes pour faire les pressions nécessaires, les réservoirs intermédiaires, les constructions, etc., le travail a coûté plusieurs dizaines de millions de francs.

» *Le développement intellectuel.* — La prospérité et le progrès de notre pays ont été déterminés, en grande partie, par le développement intellectuel dû à l'influence de la culture et de l'esprit français. Car c'est aux écoles françaises que nous avons pris, en même temps que les connaissances scientifiques, les idées larges et fécondes de vos penseurs.

» Les affinités de notre race commune nous avaient attachés à la culture française et, depuis la seconde moitié du XVIII^e siècle, cette influence n'a fait que se développer et se raffermir. En reflétant dans ce coin de l'Europe un peu de la lumière française, nos sentiments d'affection sont restés inaltérables malgré toutes les difficultés, malgré tout notre isolement, et combien nous aurions aimé que nos rapports politiques et économiques fussent à la hauteur de nos sentiments.

» Malheureusement, grâce à de multiples causes, nous devenions les clients de l'industrie allemande, et presque d'une manière exclusive en ce qui concerne les applications de l'électricité.

» *Les industries électriques.* — Sauf de minimes exceptions on peut dire que toutes les installations, toutes les organisations et tous les équipements électriques en Roumanie ont été exécutés et conduits par l'industrie allemande, par les sociétés allemandes, en nous imposant en même temps les machines, le matériel et le personnel de même origine.

» Les trois grandes sociétés allemandes A. E. G. (Allgemeine Electricität Gesellschaft), S. H. (Siemens et Halske), S. S. (Siemens et Schukert), se partageaient ce domaine en tirant de gros bénéfices.

» Les plus importantes applications de l'énergie électrique ont été faites dans l'éclairage public et privé, dans un grand nombre de villes et cela même avant les autres travaux de salubrité et d'édilité publiques, et à leur détriment peut-être.

» Et dans les plus importantes de ces villes on a adopté la traction électrique pour les tramways.

» Tous ces services se trouvent organisés dans des systèmes et par des équipements différents et variables et dénotent les caprices, les influences politiques et les intérêts électoraux de ces villes.

Leur énumération et description ne présenteraient qu'un intérêt très relatif pour le moment.

» En ce qui concerne l'organisation financière et économique, il nous suffit de savoir qu'une partie est concessionnée à des sociétés, en général allemandes, et une autre partie est administrée en régie par les communes respectives, après leurs installations par ces sociétés.

» Comme exemple, nous pouvons citer la Société Siemens-Halske qui a obtenu la concession de l'éclairage électrique à Jassy pour 40 ans, en commençant depuis 1896.

» L'équipement électrique est en courant monophasé à 3000 volts dans le primaire, 50 périodes, et à 300 volts dans le secondaire utilisable sur trois fils en deux ponts. C'est une des dispositions les moins recommandables, par suite des décharges très désagréables qu'on peut recevoir au commutateur par le défaut de l'isolement et par les différences de charges entre les deux ponts.

» Cette cause produit dans certains cas une erreur systématique et toujours positive, lorsque la bobine de voltage est disposée sur le pont le moins chargé.

» D'après les renseignements qu'on peut avoir, les affaires de cette société sont très prospères.

» La Société Siemens-Schukert a obtenu la concession des tramways électriques de Jassy; équipement en courants continus à 500 volts.

» De même pour les villes de Braïla, Galatzi, Craïva, etc.

» A Bucarest l'éclairage électrique de la ville a été concessionné à la Société du gaz (Franco-Belge) dont la concession pour l'éclairage au gaz venait au terme.

» La puissance de cette centrale pour éclairage et force motrice est prévue pour le moment de 8000 chevaux, en plusieurs unités, avec moteurs Diesel.

» L'équipement est fait en courants triphasés, 5000 volts pour le primaire, le secondaire à quatre fils, 120 volts entre phases.

» Pour le transport en commun à Bucarest, il s'est fondé une Société communale des Tramways, très prospère et dont les actions sont très recherchées. L'équipement électrique est toujours en courants continus.

» *Centrales dans les régions pétrolifères.* — Dans la région de Campina se trouve installée une usine électrique importante avec équipement en courants triphasés, 5000 volts, dans le but

de desservir comme force motrice et comme éclairage toute cette région pétrolifère.

» On sait que sur le chantier même des sondes de pétrole, à cause de la présence des vapeurs et des mélanges explosifs, tous les moteurs autres que les moteurs électriques sans collecteurs sont dangereux.

» On doit donc prévoir un grand développement de l'emploi de l'éclairage électrique dans ce genre d'exploitation.

» La proximité d'un combustible très riche comme le pétrole, et l'utilisation même des gaz qui se dégagent de certaines sondes sont des conditions très avantageuses pour la création de puissantes centrales desservant des régions très étendues, jusqu'à Bucarest même.

» *Centrales puissantes dans les régions industrielles.* — Une de ces régions est la région de Bacau-Piatra, où il y a des fabriques de papier, de drap, etc., où l'industrie du bois a pris un grand essor et qui fait entrevoir des progrès beaucoup plus importants. Comme dans cette région les gisements de pétrole paraissent moins riches que dans les autres régions, la société industrielle de Letea avait mis en étude un projet d'aménagement de la rivière Bistritza vers Bicaz pour une centrale électrique d'une puissance de quelques dix mille chevaux pour desservir toute la région jusqu'à Bacau.

» *Dans les mines de sel.* — La Roumanie possède de très riches gisements de sels et exporte beaucoup de ce produit; il y a en ce moment quatre mines en exploitation, éclairées à la lumière électrique. Mais avec le manque de main-d'œuvre on y emploiera la force motrice électrique pour faire marcher les perceuses et les autres instruments.

» *Dans les grands ports.* — Les installations des grands ports du Danube et de la mer Noire demanderont de plus en plus, pour faire face à l'activité et à l'importance du trafic des céréales, l'utilisation exclusive de l'énergie électrique.

» Pour la manutention des céréales qui passent dans les docks, les électromoteurs sont les plus indiqués, pour une raison donnée précédemment, les poussières des céréales pouvant s'enflammer en présence des étincelles.

» Il y a encore bien d'autres applications où l'emploi d'énergie électrique devient de plus en plus important.

» *Le matériel importé.* — Mais en dehors des bénéfices réalisés par les sociétés allemandes dans ces entreprises, leur industrie profitait encore du placement des machines, appareils, instruments et matériel électrique de toute sorte.

» Ainsi, d'après les statistiques officielles des dernières années avant la guerre, l'Allemagne exportait annuellement en Roumanie de ces articles pour une somme de presque 30 000 000 fr.

» *Le personnel.* — Fidèles à leur méthode d'accaparement, les Allemands nous envoyaient en même temps leur personnel de techniciens et d'ingénieurs.

» La Roumanie constituait ainsi pour l'économie allemande un triple avantage : un bon placement pour leur capital, un marché ouvert pour son industrie, et un débouché tout proche pour ses techniciens. Cette dernière invasion portait un grand préjudice à notre jeunesse, qui se voyait de la sorte évincée de ces places.

» Cette expansion, qui menaçait notre vie économique et notre indépendance, constituait un véritable péril national. C'est pour le combattre que nos Universités se sont employées à diriger nos étudiants vers les enseignements techniques industriels en créant, auprès des Facultés des Sciences, des Instituts techniques, prenant comme exemples les Instituts similaires créés en France.

» Et dans le désir de les consolider et de les développer de manière à correspondre aux urgentes nécessités de l'après-guerre, dans la Roumanie de demain, nous avons été envoyés mes collègues et moi ici en France, pour recueillir vos conseils et bénéficier de votre expérience.

» Je suis heureux de témoigner ici toute notre reconnaissance pour la très précieuse collaboration que nous ont accordée les membres de la Commission française.

» Le projet élaboré n'aurait que le seul défaut de ne pas être appliqué faute de personnel enseignant et auxiliaire si la France ne pouvait nous aider dans cette voie. Elle aurait le plus grand intérêt à maintenir et développer son influence chez nous, par ces liens intellectuels susceptibles de créer de fortes relations économiques. Et cela en vaudra la peine, car la Roumanie nouvelle compte se mettre à l'œuvre avec ardeur. Sur le grand chantier du travail, l'industrie électrique doit être la plus indiquée pour dominer l'ensemble.

» Par les quelques chiffres cités plus haut, on peut se rendre suffisamment compte des grands progrès et du grand essor économique réalisés par la Roumanie d'avant la guerre, c'est-à-dire

celle qui comprenait seulement la Valachie, la Dobroudja et la Moldavie, soit 139 690 km² avec une population de 7 601 700 âmes.

» *L'avenir.* — Par la réunion des autres provinces roumaines, Bessarabie, Bucovine, Transylvanie, Maramouresh, Crishana et Temishana, la Roumanie deviendra un pays de presque 300 000 km² (plus de moitié de la France) avec une population de 16 000 000 habitants, et de grandes perspectives d'augmentation par un excédent annuel de plus d'un quart de millions d'âmes.

» Le pays ainsi constitué contient de grandes et nombreuses richesses non encore exploitées : dans la fertilité agricole de son sol et dans ses gisements pétrolifères, dans les dépôts de sels, dans l'abondance des minerais de toute sorte, charbon et métaux précieux dans le sous-sol du massif carpathique, comme aussi dans la grande quantité de houille blanche qu'on peut récupérer sur les pentes de ces montagnes.

» Toutes ces richesses naturelles n'attendent que les conditions favorables pour leur mise en valeur.

» On peut arriver facilement à obtenir plus d'un million de chevaux de cette énergie hydraulique pour la mettre par l'énergie électrique à la disposition d'un grand nombre d'industries à créer et à développer.

» Une des conditions spécialement avantageuse pour l'utilisation de cette énergie est la position du massif des Carpathes, situé presque au milieu du pays. Les centrales éventuelles desserviront ainsi des régions à une distance maxima de 150 km. On peut donc prévoir les utilisations suivantes :

» 1^o Grâce à la production agricole, laquelle apportera pendant nombre d'années une grande prospérité dans le pays, l'éclairage électrique prendra un grand développement partout, dans les villes, dans les ports, dans les régions pétrolifères, etc.

» 2^o La traction électrique urbaine et interurbaine suivra forcément le même progrès.

» 3^o L'emploi de la force motrice dans les différentes industries agricoles d'abord, et dans le travail agricole ensuite, sera de plus en plus généralisé; il sera rendu facile et possible dans la culture intensive, qui remplacera dans un bref délai les cultures extensives actuelles, et cela comme conséquence de la nouvelle loi agricole qui supprime les propriétés latifundaires.

» 4^o On peut prévoir dans les conséquences de l'énergie électrique à bon marché la création de l'industrie de la soude par l'électrolyse du sel.

» 5^o La culture intensive du sol demandera l'emploi des engrais, ce qui déterminera la fabrication synthétique des nitrates.

» 6^o L'électrométallurgie et la métallurgie générale, en s'appuyant sur celle qui existe déjà en Transylvanie, pourra prendre le plus grand développement grâce aux mines de charbon de Petroschani et aux minerais de fer et d'autres métaux qui se trouvent en abondance dans les montagnes voisines.

» Il y aura certainement beaucoup d'autres applications qu'on ne prévoit pas encore et qui s'imposeront par la suite.

» Dans toutes ces applications, le machinisme prendra un grand développement et les électromoteurs seront le plus indiqués, grâce à leurs avantages et à mesure que les centrales électriques agrandiront leur réseau d'alimentation.

» En résumé, par ce rapide aperçu on peut prévoir que la Roumanie de demain — et nous pouvons dire celle d'aujourd'hui — possède de très grandes richesses naturelles dont l'exploitation n'a fait que commencer et pour quelques-unes seulement.

» En même temps, la Roumanie possède un trésor inépuisable dans l'énergie morale et matérielle de son peuple travailleur, loyal et bon, sobre et hospitalier, ayant toujours lutté pour sa terre, pour la justice et pour la liberté. Maintenant que, grâce aux immenses sacrifices des peuples alliés, l'humanité pacifiée aura conquis le droit à une ère de calme et de lumière, le devoir de chaque peuple est de donner le maximum d'effort pour le bien-être commun.

» La Roumanie, qui par sa situation géographique s'est trouvée être au cours des siècles la grande route de toutes les invasions barbares, pourra enfin, dans la nouvelle organisation du monde, bénéficier de cette position qui constitue la meilleure voie de communication entre le sud-est et l'occident de l'Europe.

» Voici Messieurs, en résumé, le grand champ d'activité qui nous convie et que nous ne pourrions pas organiser seuls.

» Nous voudrions y voir les industries françaises tenir la meilleure place pour nous débarrasser à jamais de la mainmise allemande dont l'extension économique servait une politique d'asservissement.

» C'est par l'influence de la culture française que nous avons développé et fortifié notre âme et notre conscience nationale.

» C'est grâce aux victoires des armées françaises et alliées que nous réalisons notre idéal d'unité.

» C'est avec le concours de la science et de la technique française que nous voudrions organiser le travail de notre production économique, et ce serait, je crois, pour le bien de nos deux pays.»

M. le PRÉSIDENT remercie M. Hurmuzescu.

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

LE CHEMIN DE FER ÉLECTRIQUE A ÉCARTEMENT DE 0,60 M ;

PAR M. L. ESBRAN.

Généralités. — Pour une ligne de chemin de fer projetée, l'écartement de la voie est un des éléments les plus importants à déterminer; quelquefois cet écartement se trouve imposé, soit par la nécessité du raccordement à une autre ligne, soit par des règlements administratifs, mais lorsque aucune condition locale n'intervient, une étude comparative s'impose entre les avantages et les inconvénients des différents écartements de voie susceptible d'être employés. Ces écartements, si nous laissons de côté les voies larges de 1,676 m, 1,60 m et 1,52 m, utilisées aux Indes, en Espagne, ou dans l'Amérique latine, tendent de plus en plus à se fixer aux environs de trois valeurs suivantes : 1,44 m, 1 m, et 0,60 m.

La voie de 1,44 m ou voie normale, est celle des grands chemins de fer, et celle dont le développement kilométrique est le plus étendu; elle représente environ 70 pour 100 de l'étendue totale des chemins de fer du monde.

La voie de 1 m, ou la voie anglaise correspondante de 42 pouces, est la voie type des chemins de fer à trafic peu intense, tels que les chemins de fer secondaires de l'Europe ou les chemins de fer destinés à desservir des vastes étendues de pays neufs, comme le Brésil ou les Indes; elle représente environ 12 pour 100 de l'étendue totale des chemins de fer du monde.

Quant aux voies à écartement voisin de 0,60 m (ou voie anglaise de deux pieds) elles ont deux principales utilisations :

En premier lieu, c'est cet écartement qui est généralement choisi pour les voies à pose rapide destinées par exemple à assurer des transports de matériaux pour des chantiers, ou encore des transports de munitions et d'approvisionnement pour les armées en campagne. Ces voies ont essentiellement un caractère provisoire.

Mais cet écartement a été également adopté pour différentes lignes secondaires, et à une certaine époque, on a pu le préférer à l'écartement métrique. En France, le réseau des chemins de fer du Calvados (226 km) a été construit avec la voie de 0,60 m.

Actuellement, le chemin de fer à voie de 0,60 m semble en défaveur et les règlements d'administration publique, toutes les fois que l'écartement normal n'est pas à recommander, préconisent l'adoption de la voie de 1 m.

Il est intéressant toutefois de noter qu'en France, le nouveau cahier des charges type, pour la concession des voies ferrées d'intérêt local de décembre 1917, a conservé la possibilité de l'emploi de la voie de 0,60 m.

L'état de la question et les tendances qui se manifestent résultent en grande partie des résultats qui ont été obtenus en exploitation avec la traction à vapeur. La construction de locomotives pour la voie de 0,60 m avec des poids maximum par essieu de 3 à 7 tonnes soulève de nombreuses difficultés d'exécution. Leur puissance est relativement faible et la machine à vapeur en unités de petite puissance est loin d'être économique.

Les vitesses atteintes en rampe sont généralement insuffisantes.

Ces raisons font que la capacité de transport des chemins de fer à voie de 0,60 m est des plus limitées, et cette limitation est un des éléments qui font donner la préférence à la voie de 1 m.

Un des avantages les plus importants de la traction électrique que l'électrification de grandes lignes a mis nettement en évidence, est la possibilité d'augmenter dans de grandes proportions le tonnage susceptible d'être transporté avec la traction à vapeur.

Il est donc intéressant d'analyser l'importance de ces avantages dans le cas de la voie de 0,60 m. A part quelques petits chemins de fer miniers, soit pour le service du fond, soit pour le service de jour, les applications de la traction électrique à des chemins de fer à voie de 0,60 m sont des plus rares. Il doit pourtant être remarqué que la force motrice par l'électricité est celle qui se prête le plus à la division de la puissance en petites unités dans d'excellentes conditions de fonctionnement et de rendement. On peut donc prévoir que la traction électrique appliquée à la voie de 0,60 m doit permettre d'augmenter sa capacité de transport dans des proportions au moins égales si ce n'est supérieures, à celles réalisées pour la voie normale; cette augmentation sera de plus accompagnée d'une diminution des frais de traction et d'une moindre consommation de charbon dans le cas de l'utilisation de ce combustible; en fait, en étudiant les conditions d'exploitation d'un chemin de fer à voie de 0,60 m équipé électriquement, on se trouve en présence d'un système de transport dont les caractéristiques sont entièrement différentes de celles de ce même chemin de fer exploité avec locomotives à vapeur, et c'est ce qui en rend l'étude particulièrement intéressante.

Voies de 0,60 m à pose rapide. — Le matériel des voies à pose

rapide a tous ses éléments subordonnés aux conditions dans lesquelles se font leur établissement.

Le poids du rail est voisin de 9 kg au mètre courant : les rails sont montés sur traverses métalliques rivées en longueur telle que l'ensemble des deux rails et des traverses formant une section puisse être manipulé facilement par un nombre d'hommes réduit.

La nécessité de réduire au *minimum* les travaux de terrassement et ouvrages d'art conduit à choisir pour les courbes le rayon minimum permissible et pour les déclivités la rampe maxima compatible avec la possibilité d'une exploitation avec la traction à vapeur.

Les rayons des courbes ne descendent pas au-dessous de 20 m et la rampe maxima est de 3,5 pour 100.

Ces voies sont posées sur le sol et ne sont ballastées qu'occasionnellement. Le poids maximum par essieu ne doit pas dépasser 3,5 tonnes.

Ces caractéristiques spéciales influent sur l'établissement des locomotives à vapeur destinées à assurer le service de ces lignes : l'empattement doit être voisin de 1,50 m pour permettre une bonne inscription dans les courbes. Le nombre d'essieux couplés ne peut être que de trois avec un diamètre de roue de 600 mm à 650 mm. Le poids adhérent se trouve fixé à 10500 kg. En fait, ces machines à trois essieux couplés ont une fâcheuse tendance au déraillement due principalement aux conditions généralement défectueuses de l'établissement de la voie.

La puissance de ces engins peut grossièrement s'évaluer, lorsqu'ils sont en bon état d'entretien, de 60 à 80 chevaux effectifs aux jantes des roues motrices.

Ci-dessous les caractéristiques de deux types de locomotives à vapeur construites pour les conditions ci-dessus spécifiées ; l'une est munie d'un petit boggie à l'avant :

	N° 1 (type 0-6-0).	N° 2 (type 4-6-0).
Poids total en tonnes :		
Vide.....	8,5	10,9
Ordre de marche.....	10,5	14,9
Poids adhérent.....	10,5	10,5
Diamètre des cylindres (mm).....	216	241
Course des cylindres (mm).....	280	305
Diamètre des roues motrices (mm).....	600	610
» » porteuses (mm).....	aucune	470
Empattement rigide.....	1400	1675
» total.....	1400	3970
Capacité des réservoirs d'eau (litres).....	900	1700

	N° 1 (Type 0-6-0).	N° 2 (Type 4-6-0).
Capacité des soutes à charbon (kg).....	500	750
Pression de la vapeur par centimètre carré (kg).....	11,2	11,2
Surface de chauffe directe (m²).....	2,15	3,34
» » tubulaire (m²).....	15,8	15,6
Surface de grille (m²).....	0,37	0,368
Effort de traction aux roues à 75 pour 100 d'admission (kg).....	2150	2430

Constructeur de la locomotive n° 1 : Kerr Stuart and Co Ltd; n° 2 : Hunslet Engine Co, Leeds.

Ces locomotives peuvent, sur une rampe de 3,5 pour 100, remorquer 25 à 30 tonnes environ avec des vitesses de 6 km à 10 km.

La traction électrique n'a jamais été appliquée à ces chemins de fer à pose rapide. Les seules difficultés que l'on rencontre sont celles de l'équipement de la voie.

Il faut en effet pouvoir installer une ligne de trolley aussi rapidement que l'on établit la voie; de plus il faut, soit prévoir cette ligne de trolley à double fil de contact: un pour l'amenée du courant, l'autre pour le retour; soit éclisser les rails. Ces difficultés paraissent assez faciles à résoudre et l'on peut imaginer divers dispositifs dont la description sortirait du cadre de cette étude.

Le système de traction électrique le plus indiqué pour ce genre d'application est certainement la traction à courant continu à 500 volts, mais le voltage du trolley semble pouvoir être porté avec certaines précautions à 1200 volts.

Les petites locomotives électriques dites *de mine*, dont les robustes caractéristiques sont connues, constituent les engins les plus adaptés au service des voies de 0,60 m à pose rapide.

Ces locomotives sont ordinairement à deux essieux; chaque essieu étant attaqué par un moteur électrique avec une simple réduction d'engrenages. Du fait de l'indépendance des essieux et des facilités du contrôle multiple électrique, on peut grouper un, deux ou trois engins de façon à constituer des ensembles à deux, quatre ou six essieux moteurs.

Sur un essieu chargé à 3,5 tonnes, l'effort de traction avec un coefficient d'adhérence de 20 pour 100 est de 700 kg. Il est facile de réaliser un moteur de 40 chevaux, 600 volts, pour voie de 0,60 m permettant de développer cet effort de traction à une vitesse de 15 km par heure environ.

Ci-dessous les caractéristiques d'une locomotive à deux essieux moteurs :

	Type 0-4-0.
Poids total.....	7
Poids adhérent.....	7
Diamètre des roues (mm).....	800
Empattement rigide (mm).....	1120
Effort de traction (kg).....	1400
Vitesse (km : h).....	15

Un ensemble de deux locomotives accouplées et commandées d'un seul poste de commande serait susceptible de remorquer les charges suivantes à 15 km par heure :

Sur rampe de 3,5 pour 100 (tonnes).....	60
Sur rampe de 4 pour 100 (tonnes).....	50

On peut aisément quadrupler au moyen de la traction électrique le tonnage utile transporté par une voie de 0,60 m à pose rapide avec la traction à vapeur. C'est uniquement une question d'avoir un nombre suffisant d'essieux moteurs par train, joint à un équipement électrique convenable de la voie et à une station centrale de puissance appropriée.

Chemin de fer à voie de 0,60 m. — Les voies à écartement de 0,60 m et à pose rapide dont les caractéristiques viennent d'être rappelées, sont trop légèrement établies pour une exploitation continue de plusieurs années sans frais d'entretien excessifs. Si l'on veut assurer un caractère permanent à un chemin de fer qui adopte cet écartement, il faut que les conditions d'établissement de la voie suivent les principes généralement admis pour les voies plus larges de 1,44 m et de 1 m. On peut citer à titre d'exemple le tramway de Pithiviers à Toury, voie de 0,60 m, de 31,3 km, ouvert à l'exploitation en 1892, dont les difficultés d'exploitation ont été exposées dans la presse technique.

Les caractéristiques qui semblent les plus favorables pour l'établissement d'un chemin de fer à voie de 0,60 m peuvent se fixer comme suit :

Le poids de 9 kg par mètre courant des voies est beaucoup trop léger; il ne permet en effet qu'un poids de 3500 kg par essieu; encore est-il prudent de ne pas dépasser 3000 kg. Pour toute traction mécanique sur rails, si l'on veut que les dépenses d'entretien de la voie ne grèvent pas les charges d'exploitation d'une façon anormale, il est prudent de ne pas utiliser des rails d'un poids

inférieur à 15 kg par mètre : une valeur recommandable est 17 kg par mètre. Dans l'exemple du tramway de Pithiviers à Toury, on a été amené à porter le poids du rail de 9 kg à 19 kg.

Avec le rail de 17 kg, on peut admettre une charge de 7000 kg par essieu; le nombre des traverses, l'infrastructure doivent être déterminés en conséquence.

La largeur de la plate-forme et du gabarit se rapprocherait des valeurs indiquées sur la figure ci-dessous et qui sont reprises au nouveau cahier de charges français (*fig. 1*).

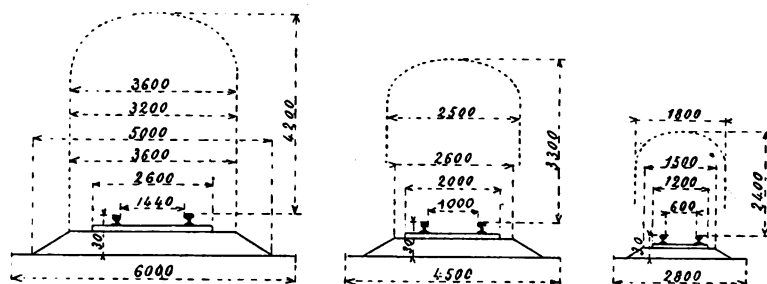


Fig. 1.

Il n'y a pas d'objection à ce que les déclivités atteignent 50 mm par mètre; toutefois pour la traction à vapeur, cette valeur est peu recommandable et devrait être réduite à 40 mm par mètre.

On ne doit pas adopter pour les courbes un rayon minimum trop faible; l'établissement des locomotives, principalement des locomotives à vapeur, devient très difficile, et les vitesses des trains sont forcément réduites par la nécessité d'attaquer les courbes à une vitesse admissible pour une bonne stabilité. Un rayon minimum des courbes de 40 m, s'il est possible, est assez indiqué, c'est d'ailleurs celui admis en France. Il permet un empattement rigide de 2,50 m environ.

Il est indispensable, lorsqu'on établit une voie ferrée, que les délais de transport, principalement pour les voyageurs, soient aussi courts que le permet une exploitation judicieuse du réseau. Il ne faut pas que les conditions d'établissement de la ligne limitent d'une façon fâcheuse la vitesse des trains comme le cas s'est produit pour un assez grand nombre de chemins de fer d'intérêt local, ce défaut est d'autant plus ressenti que la longueur de la ligne est plus étendue.

On doit donc accorder une attention particulière en premier

lieu aux vitesses commerciales susceptibles d'être réalisées dans le cas de l'adoption de l'écartement de 0,60 m.

Dans les conditions d'établissement de la voie spécifiée plus haut, la vitesse maxima permise sur une ligne à écartement de 0,60 m peut se fixer à 60 km par heure. Ces valeurs se comparent à celles adoptées pour les autres écartements de la façon suivante :

Écartement (mm).....	1440	1000	600
Poids du rail (kg).....	42	27	17
Vitesse maxima absolue (km : h).....	140	100	60
Vitesse maxima en service, alignement droit (km : h).....	120	80	45

Ces diverses vitesses indiquées pour les écartements de 1,44 m, et de 1 m sont celles admises sur un certain nombre de lignes.

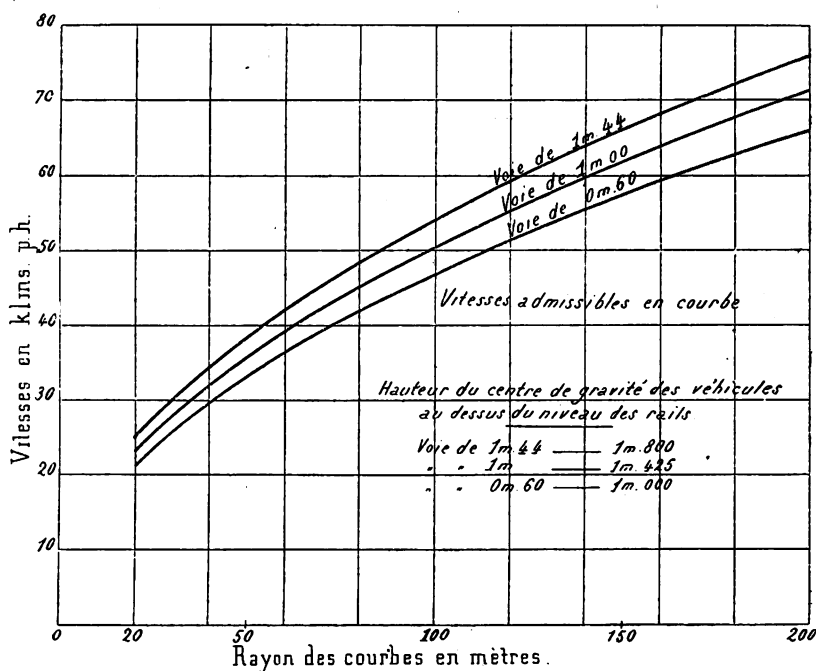


Fig. 2.

Elles dépendent en grande partie du rayon minimum des courbes adopté.

L'influence de la réduction de l'écartement de la voie sur la vitesse admissible en courbe est montré par le graphique annexé (fig. 2).

Les valeurs portées sur les graphiques sont plutôt réduites. Par exemple, pour la voie de 1 m et un rayon de 100 m, la vitesse de 50 km est celle recommandée par les règlements en Suisse; sur diverses lignes du Brésil à écartement métrique, on admet 65 km.

En adoptant un rayon minimum de courbes de 40 m pour la voie de 0,60 m, on peut attaquer les courbes à une vitesse de régime de 30 km.

Ces considérations montrent que la vitesse commerciale des convois sur voie de 0,60 m peut facilement atteindre 25 km par heure, si toutefois l'établissement de la voie et les caractéristiques du tracé ont été étudiés en conséquence.

Il y a un grand nombre de chemins de fer à voie de 1 m dont les horaires sont loin d'être basés sur cette vitesse commerciale.

Toutefois les difficultés se présentent principalement lorsque le profil est tant soit peu accidenté dans l'établissement des locomotives capables de remorquer sur voie de 0,60 m des tonnages relativement élevés à une vitesse commerciale de 25 km par heure.

Mais, tandis que, pour la traction à vapeur, ces difficultés sont insurmontables, le problème devient aisé avec la traction électrique.

Pour le matériel roulant en service sur les chemins de fer à voie de 0,60 m, les types suivants sont généralement utilisés :

	Wagon découvert.	Wagon couvert pour bestiaux.
Longueur (m).....	5	5
Tare (tonnes).....	3,25	4,50
Charge utile (tonnes).....	5	8

Les wagons à boggies sont également souvent employés :

	Wagon découvert.
Longueur (m).....	7
Tare (tonnes).....	5
Charge utile (tonnes).....	11

Pour le service des Mines de Burin dans l'Inde, des wagons en acier à déchargement automatique sont utilisés, ces wagons ont les caractéristiques suivantes :

Longueur (m).....	7,50
Largeur (m).....	1,80
Tare (tonnes).....	6
Charge utile (tonnes).....	20

On a pu objecter pour le service des voyageurs un manque de confort avec la voie de 0,60 m, mais cela tient principalement aux conditions d'établissement de la voie et non à un défaut inhérent à un écartement réduit. Il est certain qu'avec une voie bien posée et bien ballastée, un matériel roulant à boggies, les conditions de transport des voyageurs peuvent être de beaucoup supérieures à celles existantes sur différents réseaux secondaires.

Locomotives à vapeur pour voie de 0,60 m. — Un système de traction mécanique à adhérence sur rail est caractérisé :

En premier lieu par le nombre d'essieux moteurs qu'il est possible d'avoir dans un train avec le système considéré, ce qui fixe le poids maximum adhérent en tenant compte de la limitation du poids par essieu.

En second lieu, si la locomotive travaille à la limite des conditions d'adhérence, par la puissance maxima disponible à la jante des roues motrices.

Le poids maximum adhérent détermine l'effort de traction maximum aux jantes des roues motrices, ce qui fixe le poids maximum des trains pouvant être remorqués en rampe, tandis que la puissance donne la vitesse qui peut être atteinte sur cette même rampe; on fixe ainsi les deux principaux facteurs de l'utilisation la plus complète qu'il soit possible d'avoir de la ligne de chemin de fer envisagée.

La traction à vapeur a été basée presque exclusivement jusqu'à présent sur la commande par bielles et manivelles pour l'attaque des roues. En laissant de côté pour le moment les locomotives articulées, un type de locomotive à vapeur est essentiellement caractérisé par un certain nombre d'essieux moteurs, dont les roues sont couplées entre elles par des bielles. En se reportant au cas particulier envisagé pour une voie de 0,60 m présentant des rayons de courbes de 40 m, il ne paraît pas possible d'avoir plus de six roues couplées, soit trois essieux moteurs, ce qui fait que les trois principaux types de locomotives possibles sont les suivants :

$$0-6-0, \quad 0-6-2, \quad 4-6-2.$$

Si l'on admet un poids maximum par essieu de 7 tonnes, le poids adhérent de ces trois types est de 21 tonnes, et pour les deux derniers types, le poids total est voisin respectivement de 25 et 32 tonnes.

Différents systèmes de locomotives articulées ont été em-

ployés pour la voie de 0,60 m; on doit mentionner en particulier les locomotives Mallet et les locomotives Garratt.

Une des premières locomotives pour voie de 0,60 m construite en 1887 par les Établissements Decauville fut une locomotive Mallet de 12 tonnes de poids total, qui fut exposée à l'Exposition de Paris de 1889.

Les locomotives Garratt ont eu un assez grand nombre d'applications pour les voies étroites. Ce type de locomotive est caractérisé par deux boggies moteurs et la chaudière qui repose sur un châssis rigide. Le poids de la chaudière est également réparti sur les boggies. Ces boggies supportent directement les réservoirs à eau, soutes à charbon et constituent les parties les plus pesantes de la locomotive.

Les locomotives articulées sont en général loin d'avoir un aussi bon rendement que les locomotives ordinaires. Leur emploi, qui, en France, s'est peu développé sur les grands réseaux, n'est recommandable que lorsque le prix du charbon n'affecte pas d'une façon trop importante les frais de traction.

Sur la ligne du chemin de fer des Cascades aux États-Unis, la résistance propre des locomotives type Mallet, se comparait comme suit à la résistance des autres types en service pour une vitesse de régime de 24 km par heure :

	Poids total en tonnes avec tender.	Résistance moyenne en kg : tonne Locomotive et tender.
Mallet (type 2-6-6-2).....	225	31,5
Consolidation (type 2-8-0).....	143	17,2
Pacific (type 4-6-2).....	170	10,5

Le type de locomotive articulé qui paraît être le plus puissant et le plus adapté à la voie de 0,60 m considérée est le type (0-6-6-0), avec un poids total ne dépassant pas 42 tonnes, si l'on tient compte du poids maximum de 7 tonnes par essieu.

Un grand nombre de locomotives relativement puissantes ont été construites pour la voie de 0,60 m ou 0,61 m. Aux Indes, dans l'Afrique du Sud, en Tasmanie, au Brésil, des lignes assez étendues ont été construites avec cet écartement. Le tableau ci-après donne les caractéristiques principales des différents types en service.

Un type de locomotive étant choisi si le poids maximum par essieu est imposé, le poids adhérent, ainsi que le poids total, se trouvent fixés. Il reste à déterminer la puissance qu'il sera pos-

sible de faire produire à cette locomotive, puissance qui déterminera les vitesses susceptibles d'être réalisées.

	Type de locomotive.				
	0-6-2.	0-6-0.	4-6-2.	0-4-0-0-4-0.	0-4-0-0-4-0.
cartement de la voie (mm).....	600	610	610	610	610
diamètre des cylindres (mm).....	273	280	292	279	279
course des cylindres (mm).....	381	407	381	355	432
diamètre roues motrices (mm).....	711	840	762	660	800
diamètre roues porteuses (mm).....	457	»	457	»	800
empattement rigide (mm).....	1676	»	1752	990	1220
» total (mm).....	3460	»	5100	7410	8150
capacité des réservoirs (mm ³).....	1,54	1,8	3,4	3,8	3,8
capacité des soutes (kg).....	»	»	»	1000	1000
surface de chauffe totale (m ²).....	35,4	37,8	58,7	62	58,4
surface de grille (m ²).....	0,58	0,62	1,02	1,62	1,37
poids de la machine en ordre de marche (kg).....	18800	19000	25654	28000	33500
poids de la machine à vide (kg).....	14220	»	»	21500	32500
pression de la chaudière (kg).....	11,2	11,2	11,7	11,2	13,7
constructeur.....	Hunslet Eng. C ^o	Kerr Stuart.	Hunslet Eng. C ^o	Garratt.	Garratt.
poids en ordre de marche par mètre carré de surface de chauffe (kg).....	531	502	437	451	573

Du tableau ci-joint on peut déduire qu'il faut compter au minimum 425 kg de poids total par mètre carré de surface de chauffe et que, en admettant une vaporisation de 40 kg par mètre carré de surface de chauffe, une consommation de 14 kg de vapeur par cheval effectif aux roues; la puissance soutenue de ces locomotives peut grossièrement s'évaluer à 7 chevaux par tonne de poids total.

Une locomotive à trois essieux, couplés de 21 tonnes de poids total, donnera aux jantes des roues motrices environ 150 chevaux, soit 50 chevaux par essieu-moteur.

Une locomotive de type 4-6-2 de 32 tonnes de poids total pourra atteindre 225 chevaux, soit 75 chevaux par moteur.

Sur rampe, les poids des charges remorqués et les vitesses réalisées seront approximativement comme suit :

	Locomotive type.		
	0-6-0.	0-6-0-0-6-0.	4-6-2.
Poids total (tonnes).....	21	42	32
Résistance au roulement, locomotive (kg).....	12	24	12
Résistance au roulement, charge remorquée (kg).....	7	7	7
Rampe de 4 pour 100 (tonnes).....	66	121	57
Vitesse (km : h).....	10	10	15
Rampe de 5 pour 100 (tonnes).....	51	93	39
Vitesse (km : h).....	10	10	15

On déduit de ces considérations que, si l'on utilise des locomotives à adhérence complète, la vitesse des trains en rampe ne peut être de beaucoup supérieure à 10 km par heure, et que si, d'autre part, on cherche à augmenter la vitesse en choisissant un autre type de locomotive, le poids des trains doit être d'autant plus réduit que les déclivités du profil sont plus importants. La limitation de la capacité de transport d'un chemin de fer à voie de 0,60 m déterminé par le poids et la vitesse des trains sur la rampe maxima est ainsi mise en évidence. D'un côté, on a un poids adhérent limité déterminé par le nombre d'essieux moteurs dont on dispose et, d'un autre côté, les vitesses réalisées sont insuffisantes.

La traction électrique sur la voie de 0,60 m. — La traction électrique présente le caractère essentiel de pouvoir, grâce à ses facilités de contrôle, faire travailler en parallèle dans un train un nombre d'essieux-moteurs illimités en répartissant la charge entre eux d'une façon uniforme et en maintenant constant le rendement de l'ensemble, quel que soit le nombre d'essieux. De plus, particulièrement pour la voie de 0,60 m, la puissance qu'il est possible de réaliser avec des moteurs électriques pour un poids de locomotive donné est de beaucoup supérieure à celle obtenu dans les locomotives à vapeur; on peut établir des locomotives électriques à adhérence complète, travaillant à une adhérence de 20 pour 100 ou $\frac{1}{3}$ et susceptibles d'atteindre les vitesses commerciales maxima compatibles avec l'établissement de la voie. En un mot, on peut réaliser l'utilisation complète de la ligne de chemin de fer à l'écartement de 0,60 m.

Parmi tous les systèmes de traction, le plus indiqué est la traction à courant continu de 750 à 1500 volts, peut-être même à 3000 volts, avec retour du courant par les rails. L'emploi des courants alternatifs monophasés, quoique possible, a l'inconvénient de nécessiter des équipements électriques trop lourds. La traction triphasée, si avantageuse pour la légèreté des moteurs par la présence d'une double ligne de contact, augmente les dépenses de premier établissement, ce qui est un inconvénient grave pour ces chemins de fer où la question économique est au premier rang.

La disposition mécanique des locomotives électriques peut être basée, soit sur l'emploi des moteurs à simple réduction d'engrenages montés entre les roues, soit sur une combinaison d'engrenages et de bielles. La seconde disposition permet de loger sous un même poids une puissance notablement plus élevée. Il faut en effet remarquer que le moteur électrique monté entre les roues

n'est pas très avantageux pour les faibles écartements de voie; le rapport de la longueur de fer de l'induit à la distance disponible entre les bandages décroît très vite avec cette dernière distance (fig.3).

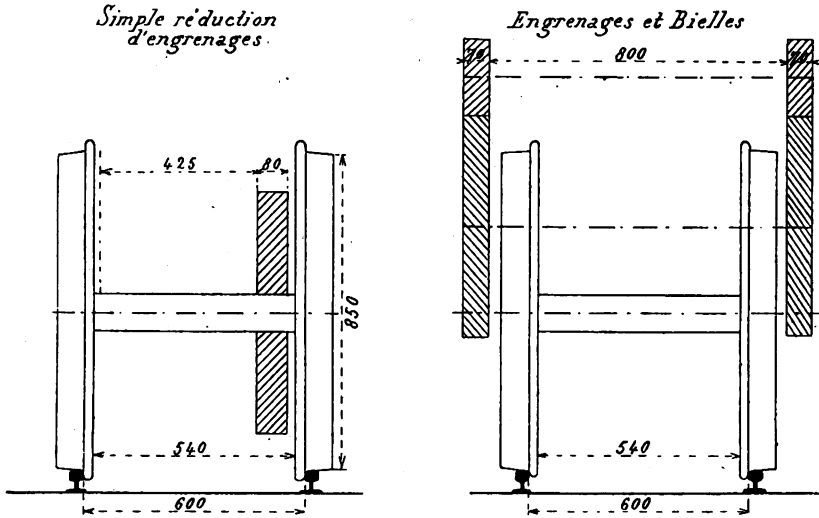


Fig. 3. — Largeur approximative d'un moteur pour voie de 0,60 m.

Dans l'état actuel de la construction électrique, il ne paraît pas possible, avec la roue de 840 mm de diamètre, de placer sur la voie de 0,60 m un moteur à courant continu de 750 volts de puissance notablement supérieure à 75 chevaux (puissance unihoraire), 20 km par heure, exerçant un effort de traction à la jante des roues de 1050 kg; un diamètre de roue supérieur à 840 mm ne paraît pas recommandable pour l'écartement considéré.

Il faut néanmoins remarquer que la locomotive de 300 chevaux à deux boggies et quatre essieux-moteurs pourrait facilement être établie sous un poids de 20 à 22 tonnes, et qu'une telle locomotive a déjà une puissance très supérieure à celle de la locomotive à vapeur. Elle a, d'autre part, l'avantage de pouvoir s'inscrire dans des courbes de faible rayon (environ 20 m), sans difficultés. Il est probable qu'une locomotive de ce genre pourrait être équipée pour un voltage au trolley de 1 500 volts, les moteurs étant constamment connectés par paire en série.

Avec l'attaque des essieux par une combinaison de bielles et d'engrenages, on peut réaliser un type de locomotive à trois essieux couplés ayant un poids total de 21 tonnes, et capable d'exercer un effort de traction de 4200 kg aux jantes des roues motrices, à une vitesse d'au moins 20 km par heure.

On peut admettre, avec un tel dispositif de commande des essieux, qu'un moteur prévu pour voie de 1 m peut être monté, avec quelques modifications légères, sur voie de 0,60 m. Le dessin ci-dessous (*fig. 4*) montre une locomotive à trois essieux couplés

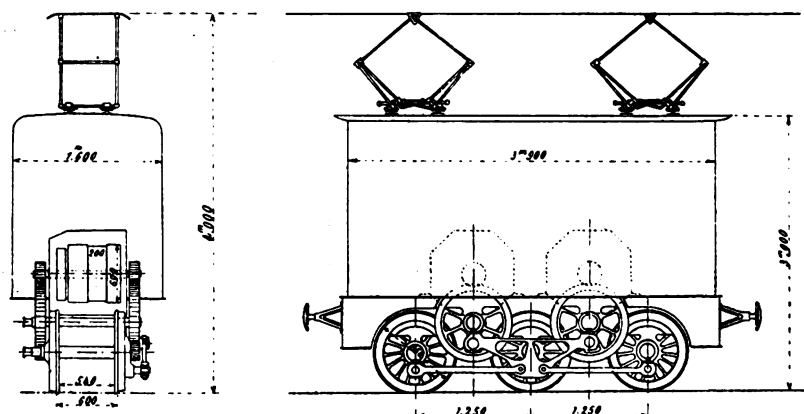


Fig. 4.

équipés avec deux moteurs de 150 chevaux. La question de savoir si ces deux moteurs peuvent être bobinés pour 1500 volts ne peut être résolue que par la pratique; au point de vue théorique, aucune objection ne se présente. Dans tous les cas, avec la commande par engrenage et bielles, la traction à courant continu 1500 volts ne soulève aucune difficulté.

Un grand nombre d'autres conceptions mécaniques d'une locomotive électrique à voie étroite peuvent être imaginées. La double réduction d'engrenages, la commande par chaîne, les engrenages coniques, etc., apportent dans l'agencement de la locomotive de grandes facilités; ces dispositifs ne sont pas envisagés parce qu'ils sortent de la pratique courante, mais on peut y recourir pour établir des locomotives encore plus puissantes que celles considérées.

Si, maintenant, on envisage le circuit formé par un fil de trolley de 50 mm² de section et les deux rails de 17 kg éclissés et connectés en parallèle, la résistance kilométrique est d'environ 0,39 ohm. Une ligne de 15 km, ainsi équipée électriquement avec un voltage au trolley de 1500 volts et des locomotives de 300 chevaux, pourrait être alimentée d'un seul point; avec deux points d'alimentation, la longueur de la ligne pourrait atteindre 40 km. Avec 3000 volts et un seul point d'alimentation convenablement choisi, la ligne, toujours en supposant les mêmes con-

ditions, pourrait avoir une longueur de 50 km; un chemin de fer de grande longueur, comme ceux que l'on rencontre dans certaines colonies, par exemple, soit 250 km, ne nécessiterait, avec la traction courant continu à 3000 volts, que trois sous-stations au maximum.

Le poids maximum des trains et les vitesses réalisées sur les déclivités de 4 et 5 pour 100 sont donnés par le Tableau suivant :

	Locomotive		
	Électrique.	Électrique.	Vapeur (type 2-6-2).
Poids total (kg).....	21	42	32
Résistance au roulement par tonne :			
Locomotive (kg).....	9	9	12
Charge remorquée (kg).....	7	7	7
Rampe de 4 pour 100 (tonne).....	67	134	57
Vitesse (km : h).....	20	20	15
Rampe de 5 pour 100 (tonne).....	52	104	39
Vitesse (km : h).....	20	20	15

Rien n'empêche avec la traction électrique d'avoir, sur rampe de 4 pour 100, des trains de 200 tonnes remorqués par trois locomotives électriques de 21 tonnes accouplées en multiple contrôle; ce train de 200 tonnes pouvant transporter environ 145 tonnes utiles.

On se rend compte qu'un chemin de fer électrique à voie de 0,60 m peut faire face à un trafic extrêmement intense et suffire pendant de longues années aux besoins d'une région; en aucun cas, ses résultats ne peuvent être comparés à ceux du même chemin de fer équipé avec la vapeur.

Si, par exemple, on considère une ligne à voie unique de 30 km, sur laquelle on doit transporter un tonnage utile de 1000 tonnes par période de 12 heures, le maximum des déclivités étant de 4 pour 100 et le nombre convenable des croisements étant prévu, le problème avec la traction à vapeur est non seulement extrêmement difficile à réaliser, mais peu recommandable au point de vue économie d'exploitation; l'adoption d'une voie plus large est certainement préférable. Avec la traction électrique, cette conclusion est erronée.

Conclusions. — L'importance des réseaux de chemins de fer d'intérêt général aussi bien que des réseaux de chemins de fer d'intérêt local a été suffisamment bien exposée pour qu'il soit inutile d'insister à nouveau sur ce point. Pour les pays neufs ou

pour les colonies, la question des transports est à la base du développement économique et commercial, mais l'établissement d'une voie ferrée est une opération nécessitant toujours une immobilisation considérable de capitaux, d'autant plus important que les régions traversées sont plus accidentées. Ces capitaux sont loin de pouvoir attendre dans bien des cas une rémunération convenable; l'État est obligé d'intervenir sous forme d'une participation financière dans les dépenses de premier établissement ou sous forme d'une garantie d'intérêt.

On se trouve en présence de deux conditions difficilement conciliables : d'un côté, il faut autant que possible diminuer le capital à engager et d'un autre côté, si l'on construit un chemin de fer, il est nécessaire que les prévisions de trafic soient largement calculées pour faire face, non seulement au trafic actuel, mais encore au trafic futur; la répercussion apportée par l'établissement d'une voie ferrée au développement d'une région ne se fait quelquefois sentir qu'au bout de 10 à 15 ans; ce serait un non sens qu'à ce moment on s'aperçoive que la capacité de transport de la ligne est insuffisante.

L'adoption de la voie large pour un chemin de fer d'intérêt local est rare, parce qu'elle entraîne des dépenses considérables. On est donc conduit à adopter un écartement réduit, ce qui supprime la possibilité de diriger sur les nouvelles voies projetées le matériel roulant ou du moins, le wagon de marchandises type des grands réseaux. C'est un inconvénient assez sérieux. Il faut donc que cet inconvénient soit racheté par des avantages financiers importants que l'on trouve généralement dans l'adoption de la voie de 1 m.

Du moment que le principe de l'échange du matériel roulant avec les grands chemins de fer est abandonné, on peut tout aussi bien réduire l'écartement à 0,60 m. C'est l'idée première des chemins de fer à voie de 0,60 m; les difficultés d'exploitation avec la vapeur et la faible capacité de transport tendent à faire abandonner cet écartement.

La traction électrique a montré la possibilité de porter le coefficient d'utilisation d'une voie ferrée à une valeur qui semblait ne pas pouvoir être atteinte : cette possibilité repose sur les deux caractères suivants :

1^o Le nombre des essieux-moteurs pour un train est théoriquement illimité;

2^o On peut utiliser complètement le poids adhérent de chaque

essieu à des vitesses de beaucoup supérieures à celles réalisées avec la traction à vapeur.

Une objection qui se présente immédiatement est que la traction électrique pour un même tracé nécessite au kilomètre des dépenses de premier établissement supérieures à celles de la traction à vapeur, puisqu'une ligne de contact est nécessaire ainsi que les installations fixes de transformation ou production de courant. Si, en principe, on a adopté la voie de 0,60 m et que le trafic que l'on peut assurer avec les locomotives à vapeur est largement suffisant; que, d'autre part, les conditions de vitesse sont satisfaisantes, l'emploi de l'électricité ne se recommande pas; sauf toutefois pour les pays où le charbon est cher, et l'énergie bon marché. Ce qu'il faut comparer, c'est le chemin de fer économique à voie de 1 m à traction à vapeur (rampe maxima 4 pour 100, rayon minimum de courbes environ 75 m), avec le chemin de fer électrique à voie de 0,60 m (rampe maxima 5 pour 100, rayon minimum des courbes environ 40 m). Ces deux systèmes ayant sensiblement la même capacité de transport.

Si un chemin de fer peut être établi sur route en accotement ou dans des conditions telles que les travaux d'infrastructure sont de peu d'importance, la différence des dépenses d'établissement entre les deux systèmes de chemin de fer sera peu accentuée; l'économie sur le matériel de voie proprement dit (rails, traverses, éclisses, etc.), quoique loin d'être négligeable, n'est pas très accusée. Mais de telles conditions se rencontrent extrêmement rarement, car les routes présentent souvent des déclivités supérieures à 5 pour 100; d'autre part, les tendances actuelles, qui se justifient entièrement, sont plutôt en faveur du chemin de fer à plate-forme séparée. On objecte, avec raison, que l'établissement de la voie ferrée sur une route gêne en premier lieu l'usage de cette route, impose des limitations de vitesse aux convois, crée en un mot des entraves à la circulation de la voie publique empruntée et à une exploitation rationnelle du chemin de fer.

Sitôt qu'il s'agit de créer et d'aménager une plate-forme spéciale pour la voie ferrée, l'écartement de la voie, le rayon minimum des courbes, le maximum des déclivités sont des éléments qui ont une influence considérable sur la longueur du tracé et les dépenses du premier établissement, principalement lorsque la région traversée est un peu accidentée.

Généralement avant la guerre, le chemin de fer secondaire à voie de 1 m (traction à vapeur), établi sur plate-forme séparée,

s'estimait dans des conditions d'établissement faciles entre 75 000 fr et 100 000 fr au kilomètre; avec un profil difficile, ces prix pouvaient arriver à doubler et même à tripler.

Un exemple classique est celui de la ligne de chemin de fer de Saint-Georges-de-Commiers à la Mure, où l'emploi de la voie de 1 m avec courbes de faible rayon a conduit à une dépense par kilomètre de 330 000 fr, alors qu'avec la voie large on eût atteint près d'un million.

Comme chemin de fer à voie de 610 mm établi dans des conditions difficiles, on peut citer la Darjeeling Himalayan Railway dans l'Inde dont les caractéristiques sont les suivantes :

Longueur (km).....	81
Pente maxima (km).....	4,3
Rayon minimum des courbes (m).....	17,3
Poids maximum par essieu (kg).....	7000

La ligne est exploitée à la vapeur.

Ce chemin de fer réunit Siliguri (altitude 120 m) à Darjeeling (altitude de 2250 m); les 11 premiers kilomètres sont sensiblement en palier. Les dépenses de premier établissement ont été de 50 000 fr au kilomètre.

Il faut remarquer que le rayon minimum des courbes a une valeur très faible, et que l'adoption d'un rayon minimum de 40 m aurait sans doute augmenté notablement les dépenses précitées; mais on doit également tenir compte que la région traversée est des plus accidentées, et que le fait de passer de l'altitude 120 à l'altitude 2250 sur une longueur de 70 km ne se rencontre pas fréquemment pour des chemins de fer de ce genre à profil difficile.

Le capital supplémentaire nécessaire pour l'application de la traction électrique qu'on pouvait, comme première approximation, fixer avant la guerre à 15 000 fr par kilomètre, sur les mêmes bases que les prix indiqués plus haut, n'influe pas sensiblement sur la différence de prix que l'on constate entre les dépenses d'établissement entre les chemins de fer à écartement métrique et à voie de 0,60 m.

Pour les lignes faciles, il est très difficile de donner des chiffres comparatifs, et chaque exemple doit être étudié séparément; sans doute, il est peu fréquent de rencontrer un rapport de 1 à 6 entre les dépenses de premier établissement des voies ferrées de 1 m et 0,60 m d'écartement, comme le fait se constate entre le chemin de fer de la Mure et le Darjeeling Himalayan Railway, mais un rapport de 1 à 4 est assez général et un rapport au-dessous de 1 à 2

extrêmement rare. C'est-à-dire que l'on peut poser en principe que le chemin de fer à voie de 0,60 m à traction électrique est généralement plus économique à installer que le chemin de fer de 1 m à traction à vapeur.

Si l'on constate, au bout de 10 à 15 ans d'exploitation, que la capacité de transport du chemin de fer électrique à voie de 0,60 m est insuffisante, c'est que le trafic est tel que la ligne en question doit être plutôt classée dans les lignes d'intérêt général, et comme telle raccordée au réseau de ces lignes. La présence de la voie étroite simplifie les travaux supplémentaires pour l'élargissement de la voie et en réduit le prix. Pour le percement des grands tunnels, n'est-il pas de pratique courante d'installer en premier lieu un chemin de fer à voie étroite, comme cela s'est fait en particulier pour les travaux du tunnel du Loetchberg.

On peut conclure de cette étude que le chemin de fer à voie de 60 cm avec traction électrique peut être un système de transport à capacité relativement très élevée. Les dépenses de premier établissement, dans la plupart des cas, sont notablement inférieures à celles d'un chemin de fer à voie de 1 m avec traction à vapeur. Les vitesses commerciales réalisées peuvent être du même ordre que celles des lignes secondaires de chemin de fer. En un mot, c'est un système de transport susceptible de rendre aux régions traversées tous les services que l'on peut attendre d'une voie ferrée; il mérite donc une étude attentive dans la plupart des projets d'établissement de chemin de fer d'intérêt local et même des chemins de fer coloniaux.



IL Y A TRENTE ANS.

Janvier 1889. — Sur un galvanomètre universel apériodique, par M. D'ARSONVAL. — Installation de la lumière électrique dans les grands magasins du Bon Marché, par M. CANCE. — Les fils aériens et souterrains, à New-York, par M. le Dr SCHUYLER S. WHEELER.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.

SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.



LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 30 FR. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. • 32 FR.

Prix du numéro : 3 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de poste.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS,

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits.

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine) et à LYON.

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

Pour la *Commande de :*

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines
installées en France
par la **Compagnie Electro-Mécanique**
et ses Licenciés,

plus de 1.200.000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Stations Centrales.

Transports de Force.

Traction électrique par courant
continu et par courant alternatif.

Éclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminoirs.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

FILS ET CABLES

POUR L'ÉLECTRICITÉ

R. ALLIOT & ROL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

38, rue de Reuilly, 38

PARIS

TÉLÉPHONE

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET C^e

QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55, A PARIS (6^e).

POMEY (J.-B.), Ingénieur en chef des Postes et Télégraphes. — Cours d'Electricité théorique, professé à l'Ecole supérieure des Postes et Télégraphes; avec une Préface de L. LECORNU, Membre de l'Institut (*Bibliothèque des Annales des P. T. et T.*), 2 volumes in-8 (25-16) se vendant séparément.

TOME I : Volume de VIII-396 pages, avec 90 figures
1914..... 13 fr.

TOME II (*Sous presse.*)

PONCHARRA (F. de), Ingénieur des Arts et Manufactures. Diplômé de l'Ecole supérieure d'Electricité — Propriétés et essais des matériaux de l'Electrotechnique. In-8 (19-12) de 152 pages, avec figures; 1904.

Broché. 2 fr. 50 c. | Cartonné., 3 fr.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET C^e,

Quai des Grands-Augustins, 55, à Paris (6^e).

Envoi franco dans toute l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris.

L'ÉLECTRICITÉ DANS LES MINES

APPLICATIONS DIVERSES. EXTRACTION,

PAR

E.-J. BRUNSWICK,

Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur en chef de la Maison Breguet

IN-8 (25-16) DE VIII-254 PAGES, AVEC 68 FIGURES; 1910..... 7 FR. 50 C.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 5 février 1919 : Admission de Membres titulaires, p. 74. — Membres décédés, p. 74. — Création d'une chaire d'Électrotechnique générale, p. 74. — Distinctions honorifiques, p. 75. — Remarques sur le fonctionnement des machines polyphasées à collecteur (M. P. **Ehrmann**), p. 77. — Recherches sur le fonctionnement chimique de l'accumulateur au plomb (M. Ch. **Féry**), p. 85. — Les alternateurs à haute fréquence (M. **Marius Latour**), p. 97.

PROJET DE RÈGLEMENT INTÉRIEUR D'ADMINISTRATION, p. 115.

IL Y A TRENTE ANS, p. 119.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 5 février 1919 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. A. LARNAUDE.

La séance est ouverte à 20 h 35 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

(¹) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

- Bezançon** (Pierre), Licencié ès sciences, Ingénieur E. S. E., 51, rue de Miromesnil, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Carantène** (Albert-Alexandre), Professeur à l'École Bréguet, 50, boulevard de Vaugirard, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Joly.
- Franck** (Marcel), Élève à l'École supérieure d'Électricité, 20, rue Ernest-Cresson, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Germani** (Denis), Ingénieur, Membre de la Mission roumaine, à Paris, Élève de l'École supérieure d'Électricité, 20, rue Dutot, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Laprand** (Raymond), Élève à l'École supérieure d'Électricité, 150, boulevard Saint-Germain, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Martin** (Georges-Henri), Attaché au Laboratoire de la Compagnie générale radiographique, 35, rue des Poissonniers, à Paris. — Présenté par MM. de La Gorce et Givélet.
- Paslaru** (Vasile), Officier gr. II. Direction générale des Postes et Télégraphes roumains. Élève Ingénieur de l'École supérieure d'Électricité, 24, rue Saint-Benoît, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Siguret** (François-Jean), Élève à l'École supérieure d'Électricité, 15, rue des Beaux-Arts, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Silhouette** (Jean-Gustave-Hyppolyte), Élève à l'École supérieure d'Électricité, 61, rue Madame, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Thévenon** (Eugène-Michel), Attaché au Bureau d'études des Ateliers Carpentier, 38, rue Delambre, à Paris. — Présenté par MM. Joly et Jeanson.

Ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de M. *Darmezin du Rousset*, décédé au Maroc, en mission de téléphonie sans fil, et de la mort au champ d'honneur de M. *Tavernier* (Ch.), tué près de Bapaume, à la fin d'août 1918.

Aux familles de nos collègues disparus, M. le Président exprime les condoléances de la Société.

M. le PRÉSIDENT adresse ses vifs remerciements aux membres de la Société qui ont bien voulu répondre à l'appel du Comité et souscrire pour la création de la chaire d'Electrotechnique générale de l'Université de Paris. A ce sujet M. le Président apporte à la Société les renseignements suivants :

A la suite d'un accord survenu entre notre Société et l'Université de Paris, il a été créé à la Faculté des Sciences de cette Université un cours d'Electrotechnique générale qui, en vertu des conventions faites, est professé à l'École supérieure d'Électricité (à l'exemple du cours de Chimie biologique qui, bien

qu'appartenant à la Faculté des Sciences, est professé à l'Institut Pasteur). M. le Ministre de l'Instruction publique a bien voulu autoriser M. Paul Janet, Professeur de Physique à la Faculté des Sciences, à professer à l'École supérieure d'Électricité le cours ainsi créé.

Cette organisation, tout en respectant pleinement l'indépendance de notre École, qui, jusqu'ici, a fait sa force et son succès, établit entre notre Société et l'Université de Paris des liens dont l'importance n'échappera à aucun des nos collègues et qui ne peuvent qu'avoir les plus heureuses influences sur l'une et l'autre de ces institutions. Nous pensons donc qu'elle sera unanimement approuvée.

L'organisation dont il s'agit entraînait d'ailleurs une charge pour la Société : afin qu'elle fût assurée pour une période de quatre ans, il était nécessaire d'assurer à l'Université de Paris une subvention de 30 000 fr. Votre Comité a été unanime à penser que cette subvention devait être immédiatement votée; mais, afin de ne pas grever notre situation financière, déjà rendue difficile par les circonstances actuelles, il a pensé qu'il y avait lieu d'ouvrir une souscription spéciale pour couvrir cette somme. Cette souscription a donné jusqu'ici les résultats suivants :

Compagnie Électromécanique.....	10 000 ^{fr}
Carpentier.....	1 000
Compagnie des Compteurs.....	1 000
Larnaude.....	1 000
Mildé.....	1 000
Société d'Éclairage et de Force par l'Électricité.....	500
	14 500

Cette souscription, bien entendu, reste ouverte pour le complément de la somme à assurer.

Nous devons, en terminant, adresser nos plus vifs remerciements à votre Président d'honneur, M. Lucien Poincaré, Vice-Recteur de l'Académie de Paris, qui a conduit toute cette affaire avec le plus grand esprit de libéralisme; grâce à lui, toutes les formalités ont été très rapidement remplies et le cours a pu s'ouvrir dès le 16 janvier dernier.

Outre nos élèves réguliers, à qui il est spécialement destiné, il est ouvert aux étudiants régulièrement immatriculés à la Faculté des Sciences.

M. le Président est heureux d'annoncer l'inscription au tableau de la Légion d'honneur pour le grade de chevalier, au titre de guerre, de MM. :

Armagnat (Henri-Marie). Titres exceptionnels : Ingénieur électricien du plus haut mérite qui, dégagé de toute obligation militaire en raison de son âge, s'est offert pour par-

ticiper aux études de l'Établissement de la Radiographie militaire. Est allé fréquemment aux armées et a fait de nombreuses ascensions en dirigeable, dans des conditions souvent dangereuses, pour mettre au point et perfectionner les appareils et les méthodes. A rendu des services considérables.

Brull (Paul-Marcel-Wolf), Capitaine (territorial) au commandement du Génie des étapes d'un groupe d'armées.

Iglesis (Sauveur), Lieutenant de réserve au Sous-Secrétariat de l'Aéronautique.

Jonaust (Raymond), Capitaine du Génie (territorial) à l'Établissement central du matériel de la Radiographie militaire.

Liouville (L.), Capitaine d'Artillerie (territorial) au 105^e régiment d'Artillerie lourde (Pondrerie nationale de Saint-Médard).

Poncharra (F. de), Capitaine d'Artillerie (réserve) à l'État-Major d'une division R. G. A.

Risler (Théophile), Capitaine (territorial) au 3^e régiment d'Artillerie à pied G. P. A.

auxquels il adresse, au nom de la Société, ses plus vives félicitations.

D'autre part, nous venons d'apprendre avec plaisir que notre Président d'honneur, M. A. Blondel, vient d'être promu officier de la Légion d'honneur. La Société française des Électriciens est heureuse d'apporter à M. Blondel ses plus vives félicitations pour l'hommage qui est ainsi rendu à ses nombreux travaux.

REMARQUES SUR LE FONCTIONNEMENT DES MACHINES POLYPHASÉES A COLLECTEUR.

M. P. EHRMANN. — « Les machines polyphasées à collecteur répondent à des besoins nombreux comme moteurs à couples et vitesses variables et comme machines montées en cascades avec des moteurs asynchrones dont elles permettent de régler le facteur de puissance et le glissement; aussi leur emploi se répand-il de plus en plus.

» Ces machines présentent certaines particularités de fonctionnement que nous nous proposons d'exposer telles que nous les avons rencontrées en cours d'essai.

1. — MACHINES MONTÉES EN CASCADE AVEC UN MOTEUR ASYNCHRONE.

» Dans le cas d'essais d'une machine à collecteurs, genre excitatrice Leblanc, montée en cascades avec un moteur asynchrone (voir fig. 4), la première difficulté que nous avons rencontrée était due à une

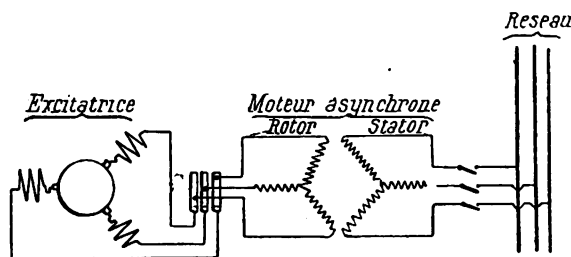


Fig. 1.

discordance anormale entre les mesures de tension faites au bornes de la machine à collecteur et les valeurs de ces mêmes tensions prévues et calculées en ne tenant compte que de l'harmonique fondamentale du courant. Tandis que la courbe de tension ainsi calculée affectait l'allure de la courbe A (fig. 2), les résultats d'essais se traduisaient par une courbe d'allure B.

» A cette première anomalie vint s'en ajouter une autre : si l'on effectuait des mesures de tension à l'aide d'un voltmètre électrodynamique à plusieurs sensibilités, on constatait que la mesure d'une même tension, faite successivement avec deux sensibilités différant par exemple de 1 à 2, donnait des indications qui différaient entre elles et semblaient indiquer que le voltmètre était faussé de

10 à 15 pour 100; ces mesures avaient cependant été précédées et suivies d'un étalonnage du voltmètre qui restait exact en courant continu et en courant alternatif à 50 périodes.

» Ces anomalies nous semblent s'expliquer de la façon suivante :

» 1^o Le champ tournant d'un moteur asynchrone peut être considéré comme étant la résultante d'une série de champs sinusoïdaux; parmi les harmoniques supérieures, l'harmonique de

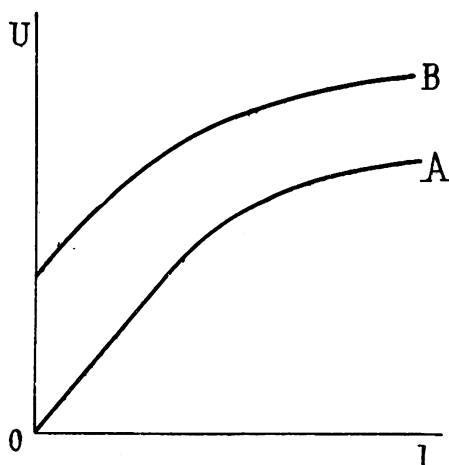


Fig. 2.

denture étant la plus importante, nous l'envisagerons seule pour simplifier des considérations qui d'ailleurs s'appliquent à l'une quelconque des harmoniques supérieures.

» L'action pulsatoire due à la denture fait varier légèrement la valeur du flux; la fréquence de ces variations est de 600 à 1200 périodes par seconde pour un moteur triphasé à 50 périodes, comportant 2 ou 4 encoches par pôle et par phase. Les courants induits dans le rotor s'opposent à ces variations et en réduisent l'amplitude à une valeur difficilement appréciable et dépourvue d'intérêt au point de vue industriel dans le cas des moteurs asynchrones à rotor en court circuit.

» Il n'en est plus de même dans le cas où l'on intercale dans le circuit rotorique une machine genre excitatrice Leblanc, compensateur Scherbius, ou vibreur Kapp; cette machine, qui peut se comporter comme un ensemble de condensateurs relativement aux courants à basse fréquence, présente pour des courants à fréquence élevée une réactance de self-induction considérable; elle s'opposera donc au passage de ces courants harmoniques de denture dans le circuit rotorique, et l'effet de la denture se traduira par une

variation sensible de champ tournant qui induira dans les enroulements du stator et du rotor des forces électromotrices à haute fréquence dont la valeur peut atteindre 2 à 3 pour 100 de la tension du stator et de la tension du rotor ouvert.

» Cette force électromotrice à haute fréquence vient s'ajouter à celle que l'onde fondamentale du courant développe aux bornes de l'excitatrice, ce qui semble expliquer nettement la différence des ordonnées des courbes A et B.

» 2° Les indications anormales du voltmètre confirment cette explication.

» Un voltmètre électrodynamique comporte deux cadres, l'un fixe, l'autre mobile, dont la réactance de self-induction est négligeable devant la résistance pure qui est mise en série, dans le cas du courant continu ou alternatif à fréquence industrielle. Il n'en est plus de même à l'égard du courant à 600 ou 1200 périodes; la réactance de self-induction des cadres prend une importance telle que si la résistance passe de 2 à 1, le courant n'augmente que de 1 à 1,7 ou 1,8 et les indications de la deuxième lecture sont inférieures à celles de la première, ce qui correspond bien à ce que nous avons observé.

» Ces observations permettent donc d'affirmer que l'amplitude des harmoniques supérieures de tension d'un moteur asynchrone augmente nettement par le fait de l'introduction d'une machine auxiliaire dans le circuit du rotor.

2. — AUTO-EXCITATION DES MACHINES POLYPHASÉES A COLLECTEUR.

» Dans certaines conditions, une machine polyphasée à collecteur peut s'amorcer spontanément en génératrice asynchrone, et débiter, sur un circuit ne comportant aucune autre source d'énergie électrique, des courants polyphasés à basse fréquence.

» Ce genre de phénomène observé et signalé fréquemment ces dernières années a été étudié d'une façon complète par M. Leblanc dans l'étude magistrale qu'il a faite des machines à très grande vitesse angulaire ⁽¹⁾. Cette étude portait sur le cas d'une machine shunt triphasée en court circuit et rendait compte exactement de la nature du phénomène, tant pendant la période d'amorçage que pendant celle du régime permanent.

⁽¹⁾ Voir *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, 1913. *Lumière électrique*, 21 et 23 décembre 1912; 4 et 11 janvier 1913; 5 et 19 juillet 1913.

» Sans avoir la prétention d'ajouter à cette étude, nous nous permettons d'apporter quelques considérations qui nous semblent faciliter la compréhension physique de ce genre de phénomène. Nous avons pu l'observer dans les conditions suivantes : le montage était celui indiqué par la figure 1 ; l'excitatrice à 4 pôles tournant seule à 1800 tours par minute s'amorçait à basse fréquence (5 à 6 périodes par seconde) et débitait des courants triphasés d'une intensité d'environ 100 ampères.

» Il semble paradoxal de voir une machine asynchrone s'amorcer d'elle-même à une fréquence déterminée.

» D'une façon générale, pour qu'une oscillation libre de fréquence déterminée puisse se produire, il faut que le système, siège du phénomène, ait une fréquence propre d'oscillations. De plus, la plupart des phénomènes vibratoires correspondent à une transformation périodique d'une même quantité d'énergie que l'on retrouve alternativement sous deux formes différentes : dans le cas de la lame vibrante, énergie cinétique d'une part, de l'autre, énergie correspondant à la réaction élastique du ressort.

» Il en est de même de la décharge oscillante d'un condensateur : la réaction du diélectrique correspond à celle du ressort, tandis que, dans le cas de la machine à collecteur, l'énergie pulsatoire se retrouve toujours sous forme d'énergie du champ magnétique, c'est-à-dire sous une forme analogue à celle de l'énergie cinétique.

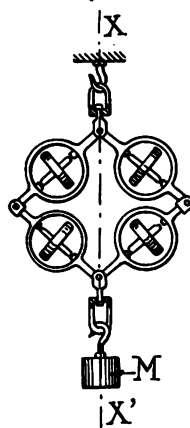


Fig. 3.

» N'est-il pas possible de rapprocher ce phénomène de celui que signale lord Kelvin dans une conférence sur la « théorie cinétique de l'élasticité » ? Il montre qu'à l'aide de 4 gyroscopes réunis comme l'indique la figure 3, on peut réaliser un système oscillant

ne mettant en jeu que de l'énergie cinétique ; tantôt celle de la masse M dans son mouvement suivant la verticale, tantôt celle de l'ensemble du système tournant autour de son axe XX' . Ce système présente une certaine analogie avec la machine qui nous occupe et dans laquelle l'énergie se retrouve toujours sous une seule et même forme, celle du champ magnétique.

» Cette analogie quoique lointaine semble cependant correspondre à une parenté réelle entre deux genres de phénomènes, dont l'un resterait étrangement isolé si cette parenté lui était déniée.

» On sait que les induits à collecteur tournant à une vitesse supérieure à celle du champ tournant sont le siège de forces électromotrices dévattées en avant par rapport aux courants et présentent, par rapport au reste du circuit, les mêmes propriétés qu'un ensemble de condensateurs, ainsi que M. Marius Latour l'a démontré ⁽¹⁾. Ces considérations nous amènent à formuler l'hypothèse suivante : *l'auto-excitation des machines polyphasées à collecteur ne pourrait-elle être envisagée comme un phénomène de résonance mettant en jeu la capacité apparente de l'induit, et la self que présente le reste du circuit ?*

» Cette hypothèse se vérifie facilement dans le cas d'une ma-

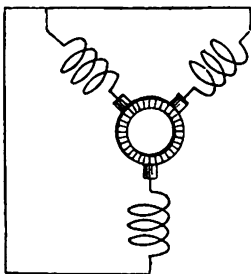


Fig. 4.

chine à collecteur série mise en court circuit, amorcée en régime permanent (voir fig. 4).

» Si les balais sont convenablement calés, les forces électromotrices induites dans le stator et le rotor sont sensiblement en opposition et décalées de $\pm \frac{\pi}{2}$ par rapport au courant de régime I .

» Considérons la self L et la capacité C qui, traversées par le même courant I présenteraient entre leurs bornes des différences de potentiel égales en grandeur et en phase aux forces électromotrices E ,

⁽¹⁾ Voir *Lumière électrique*, 12 avril 1902, p. 50; 7 juin 1902, p. 358.

et E_r induites dans le stator et le rotor de la machine à collecteur lorsque son débit est I :

$$L\omega I = E_s, \quad \frac{I}{C\omega} = E_r.$$

» En régime permanent, nous avons $E_s = E_r$ ou

$$L = \frac{I}{C\omega}.$$

» Ce qui correspond bien à la condition de résonance entre self et capacité apparente du stator et du rotor. Notre hypothèse se trouve donc vérifiée.

» En laissant de côté la période instable d'amorçage, *une étude simplifiée permet de déterminer fréquence, intensité et tension en régime permanent.*

» Exemple : envisageons le cas particulier le plus simple : soit une machine triphasée bipolaire série mise en court circuit, tournant à une vitesse angulaire Ω et débitant des courants triphasés ayant pour valeur I , par phase, la tension entre balais étant U , la fréquence des courants étant F , et par suite la vitesse angulaire du champ tournant $\omega = 2\pi F$.

» En régime permanent, l'enroulement inducteur absorbe la puissance magnétisante sensiblement égale à $\sqrt{3}UI$, débitée par l'induit.

» Si l'on suppose négligeables les résistances ohmiques, l'égalité des puissances magnétisantes fournies et absorbées se ramène à l'égalité des forces électromotrices E_s et E_r induites dans le rotor et le stator.

» Ces forces électromotrices ont pour valeur en fonction du flux Φ :

$$(1) \quad E_r = K_r \Phi (\omega - \Omega).$$

$$(2) \quad E_s = K_s \Phi \omega.$$

» Dans ces formules, K_r et K_s sont des constantes dépendant de la forme du bobinage et du nombre de spires des enroulements du rotor et du stator.

» L'égalité $E_r = -E_s$ peut être mise sous la forme

$$K_r \Phi (\omega - \Omega) = -K_s \Phi \omega$$

qui donne immédiatement la pulsation des courants débités

$$\omega = \frac{K_r \Omega}{K_r + K_s}.$$

Pour calculer intensité et tension, il faut tracer la courbe $\Phi = \rho(I)$ du flux en fonction de l'intensité, ce que les diagrammes normaux des machines polyphasées à collecteur permettent de faire facilement pour un calage quelconque des balais.

» Cette courbe déterminée, la formule permet de tracer la courbe $E_r = \rho(I)$ (courbe A, voir fig. 5).

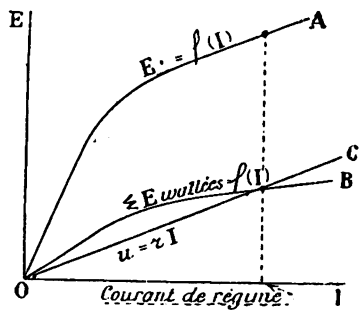


Fig. 5.

» Les forces électromotrices E_r et E_s présentent des composantes wattées qui, pour un calage de balais déterminé, sont sensiblement proportionnelles à ces forces électromotrices et peuvent être représentées par une courbe $\Sigma E_w = \rho(I)$ (fig. 5, courbe B).

» La valeur du courant de régime est déterminée par l'égalité des forces électromotrices wattées et des chutes ohmiques, si l'on néglige les pertes dans le fer, et correspond au point d'intersection de la droite $u = RI$ et de la courbe B.

» Le courant de régime déterminé donne sur la courbe A la valeur de la tension aux balais en même temps qu'aux bornes du stator. Cette méthode que nous avons appliquée à un cas particulier peut être étendue au cas d'une machine quelconque débitant sur un circuit quelconque.

» Ce mode de fonctionnement particulier des machines polyphasées à collecteur n'a pas reçu jusqu'ici d'applications industrielles, mais il peut se rencontrer accidentellement sur nombre d'installations. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Ehrmann.

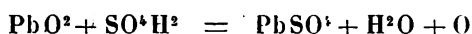
RECHERCHES SUR LE FONCTIONNEMENT CHIMIQUE DE L'ACCUMULATEUR AU PLOMB.

M. CH. FÉRY. — « La théorie actuellement adoptée pour expliquer les phénomènes de charge et de décharge de l'accumulateur au plomb est due à Gladstone et Tribe ⁽¹⁾; ces auteurs admettent qu'après charge la matière active des électrodes est, pour la positive, du bioxyde de plomb et, pour la négative, du plomb spongieux.

» Pendant la décharge, le bioxyde de plomb de la positive se réduirait puis se sulfaterait, pendant que le plomb réduit de la négative passerait lui-même à l'état de sulfate, d'où le nom de théorie de la *double sulfatation* qui lui a été donné dans les ouvrages classiques.

» Les réactions représentant ces phénomènes sont :

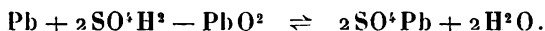
» A la positive



et à la négative



» La réaction globale fournissant le courant serait donc



» Bien que la force électromotrice, calculée en appliquant les données thermochimiques à ces réactions, soit en accord avec celle trouvée expérimentalement, cette théorie n'a pas été admise sans discussions, car elle n'est pas d'accord avec les lois générales de l'électrolyse.

» L'accumulateur n'est pas autre chose qu'une « pile secondaire » ainsi que l'appelait si justement son inventeur G. Planté : or, pendant la décharge de toute pile, l'électrolyse nous apprend que le radical acide se porte sur la négative pour l'attaquer, tandis que l'ion hydrogène se dégage à la positive en donnant les phénomènes bien connus de la polarisation.

» Peut-on admettre que le plomb fasse seul exception à cette règle si généralement reconnue?

⁽¹⁾ *La Lumière électrique*, t. VII, p. 284, et t. VIII, p. 122.

» Un certain nombre d'autres remarques semblent aussi peu conformes à la théorie de la double sulfatation : 1^o les variations de poids de la positive pendant la charge et la décharge sont pratiquement nulles; elles devraient être du même ordre que celles de la négative qui sont très nettes, l'augmentation de poids de cette dernière plaque est proportionnelle aux ampères-heures fournis; 2^o bien que prenant une teinte plus claire après décharge, la positive ne devient pas blanche comme l'exigerait la théorie; 3^o d'autre part, fait qui n'avait pas échappé à Planté, la négative voit sa teinte se foncer pendant la décharge au lieu de blanchir comme on s'y attendrait par suite de la formation de sulfate de plomb blanc; 4^o enfin on sait combien est lente et difficile la réduction du sulfate de plomb à la négative; la peroxydation de ce même composé à la positive est peut-être encore plus pénible car il est à la fois isolant et très peu soluble.

» Ayant en vue l'établissement d'un accumulateur à liquide immobilisé, j'ai pensé qu'il était indispensable d'étudier tout d'abord de très près, par voie expérimentale, la nature des matières actives avant et après décharge; de cette étude peuvent en effet résulter des indications permettant de perfectionner l'accumulateur.

» Ce dernier présente en effet pas mal de défauts sur lesquels on passe étant donné le besoin impérieux auquel il répond en électricité.

» On se plaît souvent à comparer l'accumulateur à un réservoir; il remplit assez mal ce rôle car il perd comme on sait environ 30 pour 100 de sa charge par mois.

» Les recherches que je vais résumer ont commencé en 1915, et n'ont été terminées qu'en 1918; le sujet est en effet bien délicat et les résultats tout nouveaux que j'ai obtenus demandaient à être sanctionnés par de nombreuses vérifications, car ils s'écartent complètement de ce qui était admis jusqu'ici.

ÉTUDE DE LA POSITIVE.

» Ayant détaché, d'une positive chargée à refus, la matière active des pastilles, j'ai lavé cette matière à l'eau distillée et l'ai séchée à l'étuve à 35°.

» Cette substance est d'un *beau noir* ne rappelant en rien la couleur du bioxyde de plomb appelé quelquefois *oxyde puce* à cause de sa teinte brune.

» La matière active positive, placée dans un tube à boule où passe un courant d'hydrogène sec, *s'échauffe* spontanément en dégageant de la vapeur d'eau. La réaction cesse bientôt lorsque le produit a pris la teinte caractéristique du bioxyde de plomb.

» Ce dernier d'ailleurs, soumis à la même expérience, *ne s'échauffe pas*.

» En montant une pile constituée par une lame de platine entourée de cette matière noire placée dans un vase poreux, une lame de zinc amalgamée et de l'eau acidulée sulfurique, on obtient 2,4 volts. Dans les mêmes conditions, le bioxyde de plomb donne 0,7 volt.

» Si l'on remplace dans cette expérience le vase poreux contenant la lame de platine entourée de son dépolarisant par une grille positive d'accumulateur chargée, on obtient un premier palier à 2,4 volts, puis après le crochet final un second palier commençant à 0,7 volt.

» La capacité représentée par ce second palier est considérable; si la décharge à 2,4 volts a duré quelques heures, celle qui la suit à 0,7 volt peut durer plusieurs jours; elle se termine lorsque la plaque positive est ramenée à l'état de plomb métallique.

» Enfin la matière noire extraite des alvéoles d'une positive chargée et abandonnée à elle-même à l'abri de toute poussière réductrice prend lentement une teinte moins foncée et acquiert finalement la teinte puce du bioxyde de plomb.

» Toutes ces expériences tendent à prouver qu'on a affaire à un oxyde supérieur plus riche en oxygène que Pb O^2 au début de la décharge et qui passe à l'état de Pb O^2 après le crochet normal de l'accumulateur.

» L'analyse chimique, effectuée par pesée avant et après réduction complète de la substance par l'hydrogène (en chauffant après la réduction spontanée primitive), conduit à la formule Pb^3O^7 ou $\text{Pb}^2\text{O}^{4.7}$.

» Ce résultat a été vérifié par une autre méthode (réduction par l'acide oxalique et dosage au permanganate).

» Néanmoins, il peut subsister un doute dans l'esprit : le peroxyde électrolytique si instable qu'il perd spontanément de l'oxygène pour passer à la forme plus stable Pb O^2 ne s'est-il pas désoxydé partiellement pendant le lavage à l'eau distillée et le séchage à l'étuve?

» Seul un dosage sur place, dans l'élément même où il a pris naissance, permettrait une détermination correcte.

» Pour ce faire, j'ai monté un élément constitué par une petite

positive contenant seulement 22 g de matière et deux grosses négatives d'une capacité de 40 ampères-heures.

» Dans ces conditions, la décharge est limitée par l'épuisement de la positive, ce qui permet, en admettant qu'elle passe à l'état de Pb O^2 , de calculer l'oxygène libéré et de connaître par conséquent la formule chimique du peroxyde.

» On trouve ainsi $\text{Pb}^2 \text{O}^{5,2}$, soit 4 pour 100 en plus de la formule $\text{Pb}^2 \text{O}^5$ qui a déjà été indiquée par Drezevicki ⁽¹⁾ comme représentant la constitution probable de la matière active positive. Ce corps serait l'anhydride de l'acide perplombique $\text{Pb}^2 \text{O}^6 \text{H}^2$.

» Si l'analyse chimique donne un résultat par défaut étant donnée la désoxydation spontanée de ce peroxyde, on comprend d'autre part que l'analyse électrolytique fournisse un résultat par excès, vu les produits secondaires très oxydants qui prennent naissance à la positive par l'électrolyse : eau oxygénée, ozone et peut-être même acide persulfurique. La présence de ces produits augmente apparemment de 4 pour 100 la capacité réelle de la positive. Cette expérience montre qu'il faut 7,86 g de $\text{Pb}^2 \text{O}^5$ pour fournir 1 ampère-heure.

» Une dernière propriété physique, la résistivité, est très différente pour Pb O^2 et $\text{Pb}^2 \text{O}^5$. Si l'on désigne par 1 la conductibilité du premier de ces oxydes, $\text{Pb}^2 \text{O}^5$ a au contraire une conductibilité 22 fois plus grande.

» Ainsi toutes les propriétés physiques : couleur, conductibilité, force électromotrice, concordent pour indiquer que la matière active positive n'est pas Pb O^2 . D'autre part, les propriétés chimiques sont également différentes et l'analyse du produit confirme cette manière de voir.

ÉTUDE DE LA NÉGATIVE.

» Les diverses théories émises en vue d'expliquer le mécanisme du fonctionnement de l'accumulateur sont à peu près d'accord pour admettre que le plomb réduit, constituant la matière active négative après charge, se transforme après décharge en sulfate normal de plomb Pb SO^4 .

» Ici encore les faits semblent être en contradiction avec cette supposition.

» Une première remarque, faite déjà par Planté lui-même s'ac-

⁽¹⁾ *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, t. VI, p. 414.

corde mal avec la formation d'un sel blanc : « Si l'on décharge, » dit-il, un de ces couples ⁽¹⁾ en faisant par exemple rougir un fil » de platine, la lame négative conserve d'abord dans sa partie » extérieure visible la teinte gris clair du plomb métallique pendant presque tout le temps que dure l'incandescence; mais dès » que le fil cesse de rougir, on voit apparaître un voile sombre qui » recouvre la surface extérieure de la lame et lui donne une teinte » d'un gris plus foncé. »

» Planté attribuait ce « voile d'oxyde » comme il le nomme plus loin dans son ouvrage, à une oxydation pure et simple de la négative, car il n'avait pas entrevu que le radical acide pût entrer en jeu dans le fonctionnement de son élément; pour lui, l'accumulateur au plomb fonctionnait comme le voltamètre à lames de platine, où le plomb accumulerait simplement l'oxygène de l'électrolyse pour produire des oxydes.

» J'ai voulu savoir si ce changement de teinte très net était superficiel ou intéressait au contraire toute la masse.

» Pour cela, la pâte de litharge et d'acide étendu employée pour garnir les alvéoles des grilles négatives, a été tassée au fond d'un tube de verre portant un fil de plomb le traversant en guise d'électrode. Après durcissement de cette pâte, le tube a été rempli d'eau acidulée et l'on a formé comme d'habitude cette négative, en employant une positive verticale plongeant dans le liquide.

» Après formation, si l'on fait débiter ce petit élément, on voit une zone d'un gris très foncé presque noir, commencer par la surface de la matière négative et gagner graduellement toute la masse.

» Si l'on recharge cet élément, la réduction a lieu *par la surface* en ramenant la teinte au gris clair, ce qui montre que la matière épuisée par la décharge garde une certaine conductibilité.

» Enfin si l'on détache la pastille négative déchargée et si on la met à l'air, elle *blanchit* rapidement.

» J'expliquerai plus loin ce changement de couleur.

» Une autre remarque tend également à prouver que ce n'est pas le sulfate plombique blanc qui prend naissance pendant la décharge. On sait que la variation de poids de la négative est rigoureusement proportionnelle aux ampères-heures débités ⁽²⁾, mais d'autre part ces ampères-heures sont loin de correspondre au poids de plomb réduit contenu dans la plaque.

⁽¹⁾ *Recherches sur l'électricité*, p. 63, § 68.

⁽²⁾ En ce qui concerne la positive la variation de poids est insensible; certains auteurs l'ont même trouvée négative, la plaque étant plus légère après décharge.

» Il faudrait théoriquement 3,86 g de plomb pour produire l'ampère-heure; mes expériences effectuées sur une petite grille négative, travaillant entre deux grosses positives de 40 ampères-heures de capacité, m'ont montré qu'il faut de 11 g à 12 g de plomb réduit pour fournir 1 ampère-heure ⁽¹⁾.

» Le poids de matière active négative n'était que de 25 g et l'on peut penser que, dans ces conditions de décharge, cette matière a dû donner tout ce qu'elle pouvait.

» La grande différence du chiffre expérimental (d'ailleurs indiqué déjà par les praticiens), avec la valeur théorique, est très difficilement explicable si l'on admet la formation de sulfate plombique. En effet une pastille négative épuisée par décharge, lavée à l'eau distillée puis brisée, ne montre dans sa cassure examinée au microscope aucune partie métallique. Ce n'est que par écrasement sous la lame d'un canif qu'on aperçoit de petites paillettes de plomb laminé par l'acier.

» J'ai conclu, de ces diverses remarques que la matière négative déchargée est un sous-sulfate de plomb, ou sulfate plumbeux, qui aurait sans doute la formule SO^4Pb^2 et correspondrait à l'oxyde plumbeux connu Pb^2O de couleur noire ⁽²⁾.

» Cet oxyde inférieur s'obtient en chauffant à 300° de l'oxalate de plomb dans l'acide carbonique.

» Si l'on admet la production de sulfate plumbeux, il faudrait d'après les lois de l'électrolyse $2 \times 3,86$ soit 7,72 g de plomb pour produire l'ampère-heure.

» Cette valeur est encore très éloignée de celle indiquée par l'expérience, mais il faut considérer en outre que, pendant la décharge même, il y a une action locale de l'acide sur le plomb et qui ne produit pas de courant.

» J'ai démontré ce fait de la manière suivante :

» Après décharge, la petite plaque sur laquelle je faisais mes mesures a été longuement lavée à l'eau distillée, puis rechargée

(1) La décharge faite dans ces conditions est évidemment limitée par l'épuisement de la matière négative. Le crochet final est extrêmement brusque, ce qui semble indiquer une réaction bien limitée.

La décharge obtenue inversement en employant une petite positive travaillant entre deux grosses négatives donne au contraire un coude final beaucoup plus arrondi.

J'expliquerai plus loin ces particularités.

(2) La présence constatée de parcelles métalliques non attaquées s'explique plus facilement au milieu d'un sel plumbeux que plombique.

dans de l'eau distillée entre deux lames de platine ⁽¹⁾. Le volume d'eau distillée étant de 200 cm³ on pouvait négliger ce qui restait dans la plaque 3,4 cm³ (ce qui donne à ce plomb spongieux une densité apparente de 6,2).

» Le titrage acidimétrique de la liqueur sulfurique obtenue a fourni, tant par le dosage au tournesol que par celui au chlorure de baryum, une fixation d'acide de 10 pour 100 supérieure à celle calculée par les ampères-heures fournis.

» J'ai recommencé cet essai en laissant séjourner pendant 20 heures (durée de la décharge précédente) la plaque dans l'acide, *mais sans faire débiter l'élément*. Le dosage de l'acide fixé dans ces nouvelles conditions mesure l'usure locale; ce dosage a fourni les 10 pour 100 fixés en trop dans la première décharge.

» Ainsi donc en 20 heures, il a été fixé 10 pour 100 en trop d'acide et par conséquent 10 pour 100 de plomb ont été attaqués inutilement, ce qui porte à $7,72 + 0,77 = 8,49$ g de plomb par ampère-heure le poids de ce métal attaqué.

» Il ne reste donc que $11 - 8,49 = 2,51$ g de plomb inactif, visible par écrasement de la pastille déchargée.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

» En résumé, l'expérience montre que le fonctionnement de l'accumulateur est analogue à celui d'une pile ordinaire; il est dû à l'attaque de la négative qui donne un sulfate plombé, Pb^2SO_4 , de couleur presque noire et qui correspond à l'oxyde plombé Pb^2O connu des chimistes.

» 11 g sont nécessaires à la production pratique d'une ampère-heure dans le couple Planté (décharge en 20 heures), ces 11 g se répartissent ainsi :

Plomb fournissant le courant.....	7,72
» attaqué par usure locale ⁽²⁾	0,77
» non attaqué	2,51

⁽¹⁾ Cette charge se faisait à 110 volts, avec interposition d'une résistance de 1000 ohms. Dans ces conditions un très faible courant passe au début et libère l'acide fixé, ce qui rend l'eau conductrice et permet une charge normale à 0,1 ampère au bout de quelques minutes.

⁽²⁾ Jumeau, dans son remarquable *Traité Les accumulateurs électriques*, donne le résultat de ses recherches sur la perte de charge de la positive et de la négative en fonction du temps. La courbe 136, p. 347 de cet Ouvrage, montre qu'au bout de 1 mois, la positive

» La dépolarisation est due à la réduction, à l'état de PbO^2 , d'un peroxyde répondant à la formule Pb^2O^3 , et qui peut être considéré comme l'anhydride de l'acide perplombique. Ce corps est d'un beau noir, endothermique et extrêmement oxydant. Monté comme dépolarisant dans une pile ordinaire à zinc et eau acidulée sulfurique, en le tassant autour d'une lame de platine, il donne 2,4 volts, tandis que PbO^2 ne donne que 0,7 volt.

» La résistivité de ce peroxyde de plomb électrolytique est 22 fois moindre que celle de PbO^2 .

» Enfin, au point de vue chimique, il est réduit par l'hydrogène sec avec élévation de température, production de PbO^2 et dégagement de vapeur d'eau.

» A la négative, la décharge donne lieu à un sulfate plombeux de couleur presque noire et correspondant à l'oxyde plombeux Pb^2O également noir et connu en Chimie.

» Ce sulfate plombeux a une certaine conductibilité, PbSO^1 est au contraire isolant ⁽¹⁾.

» Les deux composés nouveaux que nous avons rencontrés dans cette étude de l'accumulateur, l'un Pb^2O^3 formé à la positive pendant la charge, l'autre Pb^2SO^4 qui prend naissance à la négative pendant la décharge, n'ont pas été étudiés en Thermo-chimie.

» Nous pouvons cependant nous faire une idée des chaleurs qu'ils dégagent en se formant :

» La force électromotrice de l'accumulateur au plomb 2 volts, correspond à 89,23 calories, somme des réactions effectuées à la négative et à la positive.

» Si l'on remplace dans cet accumulateur le plomb de la négative

n'a perdu que 5 pour 100, tandis que la négative a perdu 33 pour 100, valeur voisine de celle que nous avons observée nous-même pour la baisse de charge totale.

Le dégagement continu de bulles d'hydrogène, autour des plaques négatives d'une batterie au repos, rend bien visible cette attaque lente du plomb par l'acide sulfurique.

L'usure locale déterminée dans l'expérience que j'ai faite doit être plus grande que celle qui se produit dans les éléments ordinaires, les surfaces des deux grosses positives étant de 125 fois celle de la petite positive.

Dans ces conditions, l'électrolyte doit être très oxydant, ce qui favorise la sulfatation, comme nous l'avons vu.

⁽¹⁾ Cette remarque explique la brusquerie du crochet final, lorsque la décharge est limitée par la capacité de la négative : quand tout le plomb spongieux est transformé en Pb^2SO^4 , le crochet se produit, car à ce moment ce sous-sulfate, sous l'influence du courant, se transforme à son tour en SO^4Pb isolant qui le recouvre d'une gaine protectrice. De mes essais il résulte que, dans ce cas, le crochet de fin de décharge est dû à une énorme et très brusque augmentation de résistance intérieure et non à une chute de force électromotrice.

par du cuivre on obtient une force électromotrice correspondant, d'après les données thermochimiques de Thomsen, à 65,67 calories.

» Or, d'après le même auteur, la sulfatation du cuivre ne donnerait que 55,96 calories.

» La différence $65,67 - 55,96 = 9,71$ calories correspondrait à la décomposition de Pb^2O^5 ; elle est *positive*, ce qui montre que ce composé est endothermique.

» Ceci nous permet de calculer les calories dégagées par la formation du sulfate plombé à la négative dans l'accumulateur au plomb.

» On a, en effet,

$$x + 9,71 = 89,23;$$

d'où

$$x = 79,52 \text{ calories.}$$

» D'autre part la chaleur de formation du sulfate plombique normal est connue; elle est de 73,8 calories. Le sulfate plombé dégagerait donc en se formant 5,72 calories de plus que le sulfate normal.

» Ce fait ne doit pas nous étonner; c'est une règle presque absolue en Thermochimie que les premières molécules de radical acide ou d'oxygène qui se fixent sur un métal dégagent plus de chaleur que les dernières ⁽¹⁾.

» Ainsi s'explique la force électromotrice élevée de l'accumulateur au plomb par production à la négative d'un sel de plomb dégageant plus de chaleur en se formant que le sulfate normal, et la présence à la positive d'un peroxyde endothermique concourant encore par sa décomposition à la production d'une force électromotrice de 0,22 volt correspondant à sa chaleur positive de décomposition 9,71 calories.

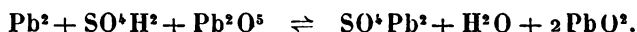
» Les réactions chimiques qui se produisent pendant la décharge

(1) La chaleur de formation du sulfate de plomb normal correspond à une force électromotrice de 1,65 volt; celle du sulfate plombé à 1,78 volt. La différence 0,13 volt en faveur de la négative spongieuse où tend à se former surtout le sous-sel, s'explique ainsi facilement.

Il n'est donc pas besoin de recourir à l'hypothèse d'un hydrure de plomb, ni de plomb à un état allotropique spécial pour expliquer la force électromotrice élevée 2 volts donnée par la négative par rapport à une lame de plomb ordinaire qui ne serait que de 1,60 volt, d'après Darrieus.

Jumeau, d'autre part, n'a trouvé aucune variation dans la force électromotrice d'un accumulateur en remplaçant la négative par une lame de plomb fraîchement grattée.

et la charge sont donc



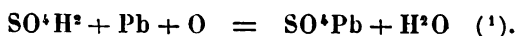
» Ces réactions montrent que théoriquement le poids de plomb engagé sur chaque électrode est le même. Pratiquement, l'expérience nous a montré que, pour une décharge de 20 heures, il n'y a environ que 70 pour 100 du plomb utilement attaqué; 7 pour 100 sont attaqués par usure locale et 2 à 3 pour 100 restent inaltérés.

» Le pourcentage du plomb inattaqué dépend évidemment de la grosseur des cristaux de plomb formant la masse négative; ces cristaux tendent à augmenter de grosseur avec le nombre de charges, ce qui explique la baisse de capacité de la négative dans les vieux éléments.

» L'usure locale indiquée par l'expérience peut sembler considérable pour le temps pendant lequel l'élément d'essai a débité. Il est bien probable que cette action locale très énergique au début, lorsque l'éponge de plomb réduit formée par la négative est bien décapée, diminue rapidement lorsqu'une pellicule de sulfate s'est formée à sa surface et joue le rôle de couche protectrice.

» Les praticiens ont coutume de dire qu'un accumulateur perd 1 pour 100 de sa charge par jour, ce qui montrerait que l'action locale se fait suivant une loi exponentielle : cette attaque serait donc particulièrement vive pendant les premières heures qui suivent la charge.

» Mes expériences ont confirmé la grande tendance que possède la matière active négative à s'oxyder pour passer à l'état de sulfate normal d'après la réaction



» De même le sulfate plombé formé pendant la décharge normale se transforme très rapidement à l'air en sulfate blanc grâce à l'acide sulfurique qui l'imprègne :



» D'où la recommandation des constructeurs de ne laisser jamais au repos une batterie déchargée.

» Dans ces conditions, en effet, grâce à l'oxygène de l'air dissous

(1) On sait qu'une négative chargée sortie du bac qui la contenait et mise à l'air devient brûlante en blanchissant.

dans l'acide ou provenant du voisinage immédiat des positives, la réaction précédente se produirait et la batterie dite *sulfatée* ne pourrait que très péniblement être ramenée à l'état normal.

» Mes expériences relatives à la mesure de la résistivité des corps formés dans l'accumulateur ont montré en effet que le sulfate normal de plomb peut être considéré comme un isolant parfait.

» Ce n'est sans doute que par électrolyse de sa solution dans l'acide de l'électrolyte, qu'on parvient à le réduire.

Au contraire SO^4Pb^2 semble avoir une assez bonne conductibilité; sa grande oxydabilité, même lavé et dépouillé de toute trace d'acide, ne m'a pas permis de faire des mesures à ce sujet.

» Les expériences qui précèdent permettent d'analyser le fonctionnement de l'accumulateur dans tous ses détails. J'ai observé par exemple que le crochet de fin de décharge est très brusque dans le cas d'un élément à positives prépondérantes, bien que le voltage de cet élément à circuit ouvert après décharge soit encore très élevé. Au contraire, si les négatives ont plus de capacité que les positives et que la décharge soit limitée par ces dernières, le crochet final est plus arrondi et le voltage à circuit ouvert est très faible.

» Dans le premier cas, en effet, le crochet est dû à une énorme augmentation de la résistance intérieure due à la formation de sulfate normal PbSO^4 qui est isolant comme on sait. Toutefois à circuit ouvert le voltage est encore de 1,7 volt à 1,8 volt, car on trouve en présence dans l'élément du peroxyde Pb^2O^3 non réduit et à la négative le plomb de la grille support.

» Au contraire, dans le cas de positives insuffisantes, on trouve après décharge Pb O^2 à la positive, et à la négative du plomb spongieux incomplètement transformé en Pb^2SO^4 .

» Le crochet est dû principalement dans ce dernier cas à la chute du voltage qui tombe de 2 volts à 0,3 volt ($\text{Pb} - \text{Pb O}^2$).

» Il résulte de ce qui précède qu'en *fonctionnement normal* jamais il ne se forme de sulfate de plomb SO^4Pb pendant la décharge; ce n'est qu'après le crochet final que ce composé peut prendre naissance à la négative par la sulfatation du sulfate plombeux, ou à la positive lorsque la réduction profonde de la matière active peut donner lieu à des oxydes inférieurs à Pb O^2 . Dans ce dernier cas, ces oxydes peuvent en effet, par l'action ultérieure de l'électrolyte, passer à l'état de sulfate normal. Ces deux cas de sulfatation profonde des électrodes sont à éviter car ce composé insoluble et isolant repasse difficilement à l'état de plomb spongieux à la négative ou de peroxyde Pb^2O^3 à la positive.

» Le minimum de poids de l'ensemble des plaques pour une capa-

cité donnée, sera obtenu quand les poids de peroxyde et de plomb réduit des positives et des négatives sera dans le rapport $\frac{7,86}{11,0}$ (1).

» J'ai rencontré dans cette étude deux composés peu connus dont l'un même, le sulfate plombeux Pb^2SO_4 , ne paraît pas avoir été signalé (2); l'autre, Pb^2O^3 ou peut-être $\text{Pb}^2\text{O}^6\text{H}^2$, a été entrevu par Drezeviecki. Ce dernier composé, en raison de son insolubilité et de celle de PbO^2 auquel il donne naissance par réduction, pourrait sans doute être employé avantageusement comme oxydant en Chimie organique.

» Il se prépare très facilement par oxydation électrolytique du minium en milieu sulfurique : le minium est placé dans un vase poreux, en évitant de trop tasser, ce qui pourrait briser le vase poreux par suite du foisonnement de la matière, et le courant est amené par une lame de platine ou plus simplement de plomb fixée dans la masse. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Ch. Féry.

(1) Ce rapport voisin de $\frac{2}{3}$ est réalisé sensiblement dans les éléments à 5 plaques dont 3 négatives et 2 positives identiques.

(2) La production d'un sous-sel de plomb à la négative s'explique par le fait que la décharge normale d'un accumulateur est due en partie à l'acide occlus dans les pores des pastilles, et qui se trouve ainsi en présence d'un *excès de métal*.

Liebenow a pu, dit-il, tripler la capacité d'un élément en forçant l'acide à filtrer au travers de la négative pendant la décharge (JUMEAU, *loc. cit.*, p. 273).

LES ALTERNATEURS A HAUTE FRÉQUENCE.

M. Marius LATOUR. — « On est arrivé depuis quelques années à réaliser industriellement des alternateurs de grande puissance (c'est-à-dire en l'espèce atteignant ou dépassant 100 kilowatts) dont la fréquence propre correspond déjà à celle des oscillations électriques des antennes de télégraphie sans fil. On a pu ainsi établir l'alimentation directe des antennes par des alternateurs sans la complication spéciale d'une transformation quelconque et avec les avantages liés à la transmission par oscillations non amorties. De nombreuses études ont déjà paru sur la question. En particulier M. J. Bethenod a présenté sur le sujet une intéressante conférence au Congrès de Lyon en juin 1914.

» Nous nous proposons d'exposer à nouveau quels sont les différents types de machine qui peuvent être réellement envisagés pour les générations de courants à haute fréquence.

» Nous ne parlerons pas du procédé suivant lequel on multiplie, extérieurement à l'alternateur, la fréquence du courant débité grâce à l'emploi de transformateurs doubleurs ou tripleurs; nous rappellerons seulement que ce procédé utilisé par la Société allemande Telefunken, et qui consiste essentiellement à saturer le circuit magnétique d'un transformateur par du courant continu pour faire apparaître des harmoniques dans la courbe du courant alternatif primaire, a été étudié en France, pour la deuxième harmonique, par MM. Léonard et Weber et par Maurice Joly (qui a signalé l'intérêt du procédé pour la haute fréquence) et, pour la troisième harmonique par M. J. Bethenod ⁽¹⁾. Ce procédé pourra faire l'objet d'une étude séparée. Notre exposé actuel vise uniquement les alternateurs donnant directement, sans dispositif extérieur supplémentaire, la fréquence demandée pour l'alimentation des antennes de T. S. F.

» Nous croyons pouvoir classer sous les dénominations suivantes les différents systèmes susceptibles de conduire à une exécution pratique et industrielle :

» 1^o Machines en cascades;

⁽¹⁾ Le procédé de M. Bethenod se distingue de celui de Maurice Joly suivant lequel la saturation est produite par le courant alternatif même. Le procédé de Joly s'adapte plus particulièrement à la basse fréquence.

- » 2° Machines à cascades internes;
- » 3° Machines homopolaires à disque;
- » 4° Machines à réluctance variable;
- » 5° Machines à utilisation partielle de la périphérie.

» *Machines en cascades.* — M. le Colonel Ferrié s'intéressait déjà en 1904 à la génération industrielle des courants à haute fréquence, et il nous posa dès cette époque le problème d'obtenir des courants de l'ordre de 80 000 périodes. On avait déjà construit des machines de 10 000 périodes; en particulier M. Lamme avait présenté devant l'*A. I. E. E.* en 1904 les spécifications d'une machine homopolaire dont nous parlerons plus loin et qui, avec des vitesses périphériques relativement modérées, donnait quelques kilowatts à 10 000 périodes.

» La production d'une fréquence de l'ordre de 80 000 périodes ne nous paraissait guère possible sans l'emploi d'artifice nouveau et nous songeâmes alors à la mise de plusieurs machines en cascade

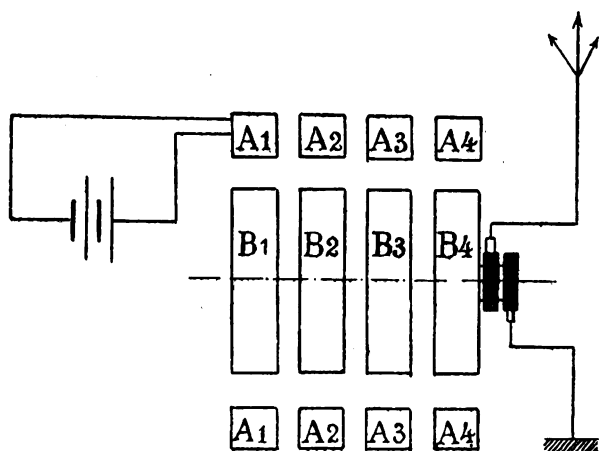


Fig. 1.

pour obtenir la fréquence demandée. Ce dispositif est représenté par la figure 1.

» Soit, à titre d'exemple, quatre machines à pôles alternés $A_1 - B_1$, $A_2 - B_2$, $A_3 - B_3$, $A_4 - B_4$, de même nombre de pôles, montées sur le même arbre. Les parties fixes et mobiles portent des enroulements que nous supposons diphasés. La machine $A_1 - B_1$, étant excitée par du courant continu en A_1 , donne des courants diphasés de fréquence f dans B_1 . Les courants de fréquence f ainsi obtenus dans B_1 sont recueillis par l'intermédiaire de bagues non

représentées sur la figure et alimentent des enroulements diphasés disposés sur l'inducteur A_2 de la machine $A_2 - B_2$ de façon que le champ tournant ainsi produit se déplace en sens inverse du sens de rotation de l'arbre : les courants obtenus dans B_2 sont alors des courants diphasés de fréquence $2f$. Ces derniers courants sont recueillis à nouveau pour alimenter l'inducteur A_3 de la machine $A_3 - B_3$ de façon que le champ tournant ainsi développé tourne en sens inverse de la rotation de l'arbre : les courants obtenus dans B_3 sont alors des courants de fréquence $3f$. Les courants de fréquence $3f$ servent enfin à alimenter en A_4 la machine $A_4 - B_4$. On arrive ainsi à recueillir dans l'induit B_4 un courant de fréquence $4f$ qui alimente l'antenne. On conçoit immédiatement qu'en multipliant le nombre de machines on arriverait à multiplier la fréquence indéfiniment. Avec n machines, on obtiendra la fréquence nf , f désignant la fréquence propre de chaque machine.

» On peut arriver à supprimer la complication des bagues entre les circuits successifs ainsi que les bagues en B_4 en faisant jouer alternativement aux parties fixes et mobiles le rôle d'inducteur et d'induit. Il suffit que dans la figure les inducteurs soient A_1, B_2, A_3, B_4 et que les induits soient B_1, A_2, B_3, A_4 . Les connexions entre machines peuvent être faites avec interposition de capacités pour annuler la réactance des enroulements. Lorsque nous proposâmes une disposition de ce genre on nous signala des antécédents et nous abandonnâmes la question. Les détails nouveaux que nous apportions, multiplication de la fréquence avec bobines polyphasés et non monophasés et suppression éventuelle des bagues ont cependant une réelle valeur de réalisation. Quoi qu'il en soit, aucune tentative d'exécution n'avait été faite ni à l'étranger ni en France jusqu'en 1912. A cette date M. Bethenod construisit le premier alternateur à haute fréquence basé sur le principe de la figure 1. Dans cet alternateur d'essai chaque machine élémentaire avait une fréquence propre de 6000 périodes sous la vitesse périphérique de 120 m. Bien que cet alternateur fût construit avec des tôles relativement à fortes pertes pour la haute fréquence (tôles au silicium de $\frac{25}{100}$ d'épaisseur), M. Bethenod obtint dans une antenne une puissance de l'ordre du kilowatt à

$$4 \times 6000 = 24000 \text{ périodes.}$$

» On voit assez facilement les conditions de fonctionnement du système représenté par la figure 1. La première machine $A_1 - B_1$ fonctionne uniquement comme générateur, la deuxième machine

$A_2 - B_2$ fonctionne moitié comme générateur et moitié comme transformateur, la troisième machine $A_3 - B_3$ fonctionne au $\frac{1}{3}$ comme générateur et aux $\frac{2}{3}$ comme transformateur, la quatrième machine au $\frac{1}{4}$ comme générateur et aux $\frac{3}{4}$ comme transformateur. D'une façon générale la $N^{\text{ième}}$ machine fonctionnerait au $\left(\frac{1}{N}\right)^{\text{ième}}$ comme générateur et aux $\left(\frac{N-1}{N}\right)^{\text{ième}}$ comme transformateur.

» Nous remarquerons que le système des machines en cascade présenterait un avantage particulier pour les très grandes puissances. Supposons, par exemple, que l'on veuille disposer d'une puissance dans l'antenne de 500 kilowatts à 15 000 périodes ⁽¹⁾. Cette puissance sera assez difficilement réalisable avec une seule machine d'un type quelconque et d'autre part le couplage en parallèle de plusieurs alternateurs ne semble pas devoir encore être envisagé dans le cas de la haute fréquence. On sera donc conduit à coupler *mécaniquement* deux machines entre elles et ceci pourra sembler être une complication.

» Avec le système des machines en cascade, on peut, au contraire, constituer plusieurs groupes indépendants. Ainsi on pourra réaliser deux groupes comportant chacun deux machines élémentaires, qui seront prévus pour donner 250 kilowatts à 7 500 périodes. La mise en cascade des deux groupes donnera 500 kilowatts à 15 000 périodes. On pourra encore réaliser trois groupes comportant chacun deux machines élémentaires, qui seront prévus pour donner 166 kilowatts à 5 000 périodes. La mise en cascade des trois groupes donnera encore 500 kilowatts à 15 000 périodes.

» *Machines à cascades internes.* — M. P. Boucherot a énoncé en 1893 (voir *Lumière électrique* du 25 mars 1893, p. 554) le théorème suivant :

« Dans un alternateur à courant alternatif simple et à pôles
» alternés, l'induit est le siège d'une force électromotrice et d'un
» courant représentés par une série infinie de termes *impairs* de
» la série de Fourier et les inducteurs le siège d'une force électro-

⁽¹⁾ La tendance actuelle, conformément à des idées exprimées antérieurement par M. Bethenod, est de travailler avec de grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire des fréquences relativement faibles; ceci d'autant plus que la puissance mise en jeu est plus élevée. Pour 500 kilowatts on peut donc envisager 20 000 m de longueur d'onde, soit 15 000 périodes.

» motrice et d'un courant représentés par une série infinie de
» termes *pairs* de la série de Fourier. »

» M. Boucherot a écrit ensuite :

« Les coefficients des courants de fréquences successives vont
» naturellement en décroissant et décroissent très rapidement à
» cause de la self-induction des deux circuits qui réduit d'autant
» plus les valeurs des intensités que la fréquence est plus grande.
» Mais il ne faudrait pas croire que ce soit un fait inévitable; il
» est possible de faire croître les coefficients au lieu de les faire
» décroître; il est également possible de les faire croître jusqu'au
» *Nième* terme, puis décroître ensuite à l'aide des propriétés remar-
» quables des condensateurs, ce qui permet d'obtenir des courants
» de fréquence très élevée et de faire des machines donnant toutes
» sortes de fréquences, mais dont les courants d'une fréquence
» donnée seraient les plus intenses et pourraient par conséquent
» être considérés comme courants principaux. »

» La machine de M. Goldschmidt, représentée schématiquement

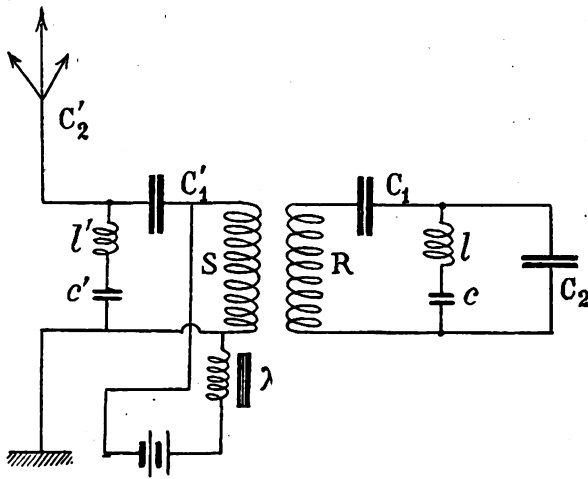


Fig. 2.

par la figure 2, a été la mise en œuvre en 1907 des idées exprimées par M. Boucherot en 1893.

» Le stator et le rotor de l'alternateur monophasé à haute fréquence du type Goldschmidt sont indiqués dans la figure par les lettres S et R.

» Dans cet alternateur, on met en évidence les fréquences im-

paires f et $3f$ dans le rotor et les fréquences paires $2f$ et $4f$ dans le stator; cette dernière fréquence $4f$ devient à proprement parler la fréquence d'utilisation. Le rotor est fermé sur un système d'inductance et de capacités tel que le rotor puisse entrer à la fois en résonance sur les deux fréquences impaires f et $3f$; dans ce but, la dérivation $l - c$ étant constituée de façon à établir un court circuit pour la fréquence f , la capacité C_1 est prise de valeur telle qu'elle équilibre la réactance du rotor à la fréquence f , et la capacité C_2 est prise de valeur telle que, combinée avec la dérivation $l - c$ et la capacité C_1 , elle équilibre la réactance du rotor à la fréquence $3f$. Sur le stator excité par du courant continu à travers l'inductance de protection λ , on établit un système d'inductance et de capacités $l'c'$, C'_1 , C'_2 , absolument analogue pour permettre la mise en résonance du stator sur les fréquences $2f$ et $4f$. La capacité C'_2 est, en fait, représentée par le circuit d'antenne.

» Cet alternateur Goldschmidt semble avoir séduit les spéculateurs de tous pays et l'on parle volontiers de « l'admirable » machine Goldschmidt. Cependant cette machine ne se distingue pas notablement ni dans son principe ni dans sa valeur pratique du système comportant des machines en cascade.

» Le courant de fréquence f engendré dans le rotor donne lieu par rapport au rotor à un champ alternatif que l'on décompose, suivant le théorème de Fresnel transposé en Électrotechnique, en deux champs tournants de grandeur moitié. L'un de ces champs tournants se déplace dans le sens même du sens de rotation du rotor à la fréquence f et développe par suite un courant de fréquence $2f$ dans le stator suivant le principe même du montage des machines en cascade. Ce courant de fréquence $2f$ donne lieu à un champ alternatif qui se décompose à son tour en deux champs tournants dont l'un tourne en sens inverse du sens de rotation de l'arbre et développe, toujours sur le principe des machines en cascade, un courant de fréquence $3f$ dans le rotor. Ce courant de fréquence $3f$ donne lieu encore à un champ tournant de fréquence $3f$ qui, entraîné par le rotor, donne un courant de fréquence $4f$ dans le stator. En somme la machine de la figure 2 présente essentiellement la particularité de totaliser en une seule machine l'ensemble des quatre machines en cascade de la figure 1; mais la totalisation de plusieurs machines en une seule est sans conséquence au point de vue du rendement et de la puissance spécifique ainsi que nous l'avons déjà démontré (voir *Lumière électrique* du 22 juin 1912, p. 357).

» En effet, considérant les pertes dans le fer nous pouvons dire: un champ Φ tournant par rapport au fer et à une vitesse quelconque ω

dans un sens arbitraire positif ou négatif donne lieu à des pertes p . Ainsi des champ Φ_1, Φ_2, Φ_3 tournant à des vitesses *différentes* en grandeur ou en signe $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ donneront lieu, considérées isolément, à des pertes $p_1, p_2, p_3, \dots$. Or si tous ces champs tournants différents coexistent, ils donnent lieu à des pertes totales qui sont simplement égales à la somme des pertes $p_1 + p_2 + p_3 + \dots$.

» Considérant les pertes dans le cuivre nous pouvons dire également : un système de courant i engendrant un champ tournant à une vitesse ω dans un sens arbitraire, positif ou négatif, donne lieu, dans des enroulements donnés, à certaines pertes par effet Joule ω . Ainsi des systèmes de courants $i_1, i_2, i_3, \dots$ engendrant des champs tournants à des vitesses *différentes* en grandeur ou en signe donneront lieu, considérés isolément, à des pertes $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$. Or, si tous ces systèmes de courants différents coexistent dans les mêmes enroulements, ils donnent lieu à des pertes totales qui sont simplement égales à la somme des pertes $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots$.

» Si l'on totalise également les pertes de toutes les machines dans une seule, il en résulte très simplement que, pour retrouver le même échauffement, on devra donner à la machine unique la largeur de plusieurs machines mises côte à côte et qu'il n'y aura aucun bénéfice.

» A ce propos remarquons qu'il résulte des considérations ci-dessus, déjà formulées par nous dans la *Lumière électrique* en 1912, que dans les machines à haute fréquence à pôles alternés ainsi que dans toutes les machines où l'on travaille loin de la saturation, le rendement électrique est indépendant de l'échauffement, c'est-à-dire de la surcharge.

» En doublant le flux inducteur et le débit on quadruple les pertes, mais on quadruple aussi la puissance. Le rapport entre les pertes et la puissance débitée reste constant. La puissance volumique est ainsi limitée par la faculté d'évacuation de la chaleur produite. On voit aussitôt l'avantage du refroidissement artificiel. Ce refroidissement est d'autant plus avantageux que les grandes vitesses périphériques admises dans les machines à haute fréquence entraînent de grandes pertes par ventilation qui sont relativement d'autant plus faibles que la puissance débitée est plus grande.

» En vue de réduire les pertes par ventilation nous avons proposé, certainement après d'autres (voir *Lumière électrique*, 22 juin 1912, p. 356), de tourner sous une pression atmosphérique réduite, mais il y a là une complication qu'il appartiendra à la pratique d'apprécier.

» L'avantage de la machine Goldschmidt est de permettre

l'emploi d'un enroulement monophasé sur le rotor, mais elle ne donne pas comme le système en cascades l'avantage de la subdivision de la puissance.

» *Machines homopolaires à disque.* — La machine homopolaire ou à fer tournant ne comporte pas d'enroulement sur la partie mobile. C'est là un avantage important dès que l'on envisage des vitesses périphériques élevées. Aussi cette machine a-t-elle été utilisée dès la première heure pour réaliser des fréquences élevées. M. Thury a construit, de 1893 à 1900, un certain nombre de machines homopolaires à 10 000 périodes (une dizaine environ). Une de ces machines était exposée en 1896 à l'Exposition de Genève (voir *Eclairage électrique* du 24 octobre 1896, p. 157). Cette machine était du type homopolaire « à cloche » préconisée par M. Thury à cette époque. L'inducteur tournant comportait 200 projections polaires et tournait à 3000 tours pour la fréquence 10 000. A cette fréquence, elle fournissait une puissance de 3 à 4 kilowatts; sa tension à vide était de 150 volts. M. Thury a utilisé dans ses constructions des inducteurs pleins et des inducteurs feuilletés.

» En 1904, M. Lamme a également construit une machine homopolaire dont il a fait connaître les détails de construction à

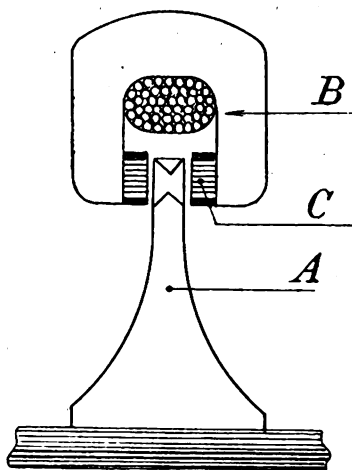


Fig. 3

l'A. I. E. E. Cette machine est du type absolument normal, mais c'est la première fois qu'on voit apparaître des tôles spéciales de faible épaisseur (0,075 mm) dans la construction des machines électriques. Le diamètre de l'inducteur était de 62 cm et la vitesse

de 3000 tours. La vitesse périphérique était par conséquent de 100 m. Il semble qu'en poussant davantage l'excitation de cette machine et en utilisant une capacité en série avec l'induit pour lever la réactance, on aurait pu obtenir une puissance bien plus élevée que celle indiquée par M. Lamme (2 kilowatts).

» M. Alexanderson a construit les machines homopolaires sous la forme à disque pour pouvoir admettre des vitesses périphériques plus élevées de 200 à 300 m. La figure 3 représente une machine homopolaire construite suivant Alexanderson. La bobine B donne lieu à un champ continu qui traverse le disque A et l'induit feuilleté C. Le disque porte de part et d'autre des proéminences polaires radiales et l'induit un enroulement dont les conducteurs sont disposés dans des encoches radiales.

» M. Alexanderson a d'abord cherché à réduire les pertes par ventilation en disposant des pièces non magnétiques entre les proéminences polaires du disque de façon à réaliser une surface de révolution parfaitement lisse. Il a ensuite transformé ces pièces non magnétiques en pièces conductrices réunies extérieurement entre elles de façon à constituer une cage d'écureuil sur chaque face du disque. Un semblable système amortisseur peut réduire les pertes dues au débit de la machine.

» En réalité on pourrait feuilletter les pièces polaires en les reportant dans des fenêtres établies dans un disque plein en bronze conducteur comme le représente la figure 4. On réduirait de cette façon au minimum les pertes dans la partie mobile.

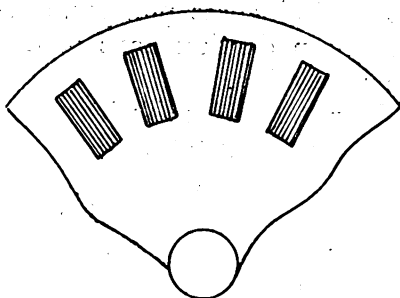


Fig. 4.

» Il convient ici d'attirer l'attention sur une particularité de la caractéristique à vide des machines homopolaires signalée depuis longtemps (voir par exemple Alexanderson, *A. I. E. E.*, 1909, p. 410). Cette caractéristique n'a pas l'allure de la caractéristique à vide des machines à pôles alternés rappelant celle de la courbe

d'aimantation du fer, mais bien une allure telle que celle représentée par la figure 5. La tension à vide, après avoir augmenté avec

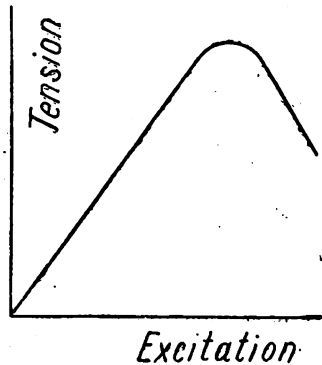


Fig. 5.

l'excitation, passe par un maximum et décroît ensuite avec l'excitation.

» La raison de cette particularité est connue. La saturation, en effet, intervient ici pour deux raisons. Elle intervient d'abord à la façon habituelle en diminuant l'accroissement du flux par rapport à l'accroissement d'excitation, et elle intervient ensuite en tendant à effacer les pôles du rotor en quelque sorte puisque les intervalles vides en arrivent à émettre du flux comme les proéminences polaires. La différence d'émission de flux entre les intervalles vides et les proéminences polaires, qui constitue à proprement parler la variation de flux dans la machine, tend donc à disparaître avec la saturation.

» L'effet de ces deux raisons combinées est qu'il y a un maximum de tension pour une certaine excitation. Si l'on veut tirer la puissance maximum de la machine, on travaillera près de cette tension maximum qui ne correspondra pas généralement à une variation de flux excessive dans les dents de l'induit. Mais dans ces conditions on n'aura plus le droit de dire, comme nous l'avons fait pour les machines à pôles alternés, que le rendement électrique de la machine homopolaire est indépendant de la surcharge. En effet, la surcharge ne pourra cette fois être introduite que par le débit, et le raisonnement simple que nous avons fait ne peut plus s'appliquer. Les pertes introduites seront généralement plus que proportionnelles au débit et le rendement électrique diminuera avec la surcharge.

» Une autre observation qu'il convient de faire sur les machines homopolaires vise les pertes par hystérésis.

» Suivant les mesures de M. John D. Ball lorsqu'on passe d'une induction B_1 à une induction B_2 , de façon à obtenir une variation alternative d'induction $\frac{B_1 - B_2}{2}$, les pertes par hystérésis sont d'autant plus grandes que l'induction moyenne $\frac{B_1 + B_2}{2}$ est plus élevée. En d'autres termes, le coefficient dit de Steinmetz dépend de la valeur de l'induction moyenne autour de laquelle se fait la variation de flux considérée. La figure 6 donne la valeur de η en

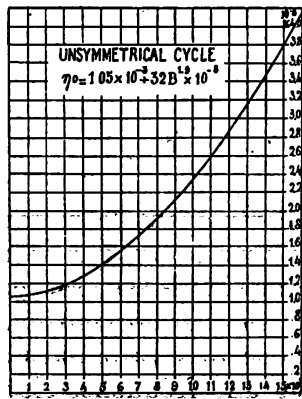


Fig. 6.

fonction de $\frac{B_1 + B_2}{2}$. On voit d'après cette courbe qu'à l'induction moyenne de 10 000 par exemple les pertes par hystérésis sont multipliées par 2,3 et à 14 000 par 3,5.

» On arriverait donc à cette conclusion que dans les machines homopolaires les pertes par hystérésis sont plus élevées que dans les machines à pôles alternés, et que la finesse des tôles ou leur teneur en silicium visant à la seule réduction des pertes par courants de Foucault importe moins que dans ces dernières.

» *Machines à réluctance variable.* --- Une première forme de la machine à réluctance variable est représentée par la figure 7. Elle comporte un enroulement d'excitation sur le stator qui peut, ainsi que M. Bethenod l'a indiqué, constituer en même temps l'enroulement d'induit à la condition d'intercaler une inductance comme représenté sur la figure.

» Lorsque les dents du rotor sont en face des dents du stator on

a un flux maximum dans l'induit; lorsque les intervalles vides sont en face des dents, on a un flux minimum. On obtient ainsi une force électromotrice qui a la même fréquence que celle d'une

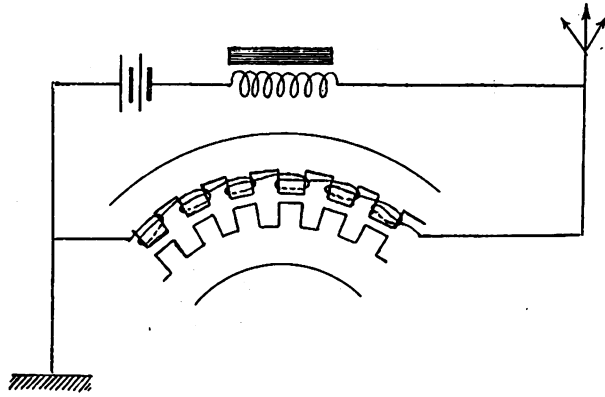


Fig. 7.

machine homopolaire comportant le même nombre de dents ou projections polaires au rotor, bien que le nombre d'encoches sur le stator soit réduit de moitié. Il est vrai que les encoches doivent livrer passage cette fois au courant continu. Le rotor est nécessairement feuilleté puisque le flux varie dans ce dernier.

» Dès qu'on envisage une fréquence élevée, les dents du rotor sont fines et rapprochées et les variations de flux effectives dans l'induit sont très faibles par rapport au flux total. Cependant le flux change de signe dans chaque dent rotorique pour la valeur totale du flux, pour un déplacement correspondant à un intervalle polaire; c'est dire que les pertes dans le rotor peuvent être beaucoup plus grandes que dans le stator. Le rendement de la machine, à impédance variable, devient bientôt très inférieur à celui d'une machine homopolaire dont les proéminences polaires du rotor sont toujours traversées par un flux de même signe.

» Mais la machine à impédance variable peut prendre également la forme homopolaire. Il suffit de se représenter une machine homopolaire entièrement feuilletée parallèlement à l'arbre dont le stator à encoches ouvertes et sans enroulement comporte un nombre de dents égal au stator et au rotor (voir *fig. 8 et 9*). On remarque aussitôt que la bobine centrale d'excitation est absolument comme dans le cas de la figure 7 traversée par un flux maximum ou minimum suivant que les dents du stator sont en face des dents du rotor ou que les intervalles vides d'un des organes sont en face

des dents de l'autre. Cette fois le flux ne change jamais de signe dans les dents du rotor et l'on a, au point de vue des pertes, tous les avantages de la machine homopolaire.

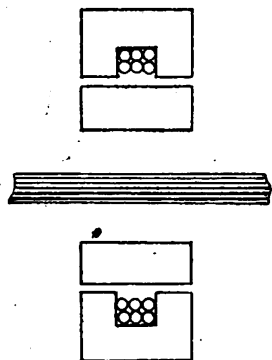


Fig. 8.

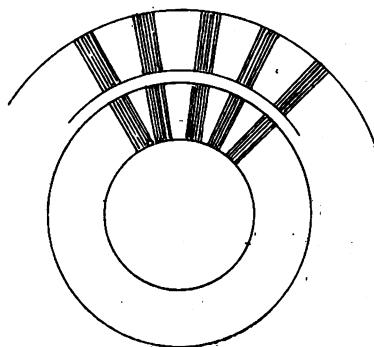


Fig. 9.

» Théoriquement, comme il n'y a pas de conducteurs à loger dans les intervalles vides du stator, on pourrait exécuter cette machine pour une fréquence quelconque. Si l'on suppose par exemple une vitesse périphérique de 150 m, on aboutirait avec des dents de l'ordre du millimètre à une fréquence de près de 100 000 périodes. Mais en réalité, il faudrait supposer que l'entrefer diminue avec la largeur des dents, ce qui est mécaniquement impossible. On verrait sans peine en effet que la réluctance pour les deux positions extrêmes représentées par les figures 10 et 11 devient sensiblement la même dès que la largeur des dents descend à l'ordre de grandeur de l'entrefer. Avec un entrefer de $\frac{5}{10}$ on peut cependant admettre avec avantage des dents de 2 mm et obtenir directement une fréquence de l'ordre de 40 000 périodes.

» Il existe un moyen d'accroître la différence entre le flux



Fig. 10.



Fig. 11.

maximum et le flux minimum correspondant aux deux positions extrêmes des figures 10 et 11. Il consiste à disposer dans les inter-

valles vides du stator et du rotor des pièces conductrices faisant fonction d'amortisseur pour le flux émis par les faces latérales des dents.

» Dans la position représentée par la figure 10 (flux maximum) une dent émet un flux dans l'entrefer plus deux flux latéraux identiques. Dans la position représentée par la figure 11 (flux minimum) une dent émet quatre flux identiques qui vont de la surface d'entrefer à la face latérale d'une dent.

» Considérons l'excitation faite par un courant unité, et soient :

Φ le flux d'entrefer d'une dent dans la position de la figure 10;

φ un flux latéral émis sur chaque face de dent dans la position de la figure 10;

ψ un flux allant de la surface d'entrefer à la surface latérale d'une dent dans le cas de la figure 11.

» Le flux embrassé par l'induit oscille entre les valeurs $\Phi + 2\varphi$ et 4ψ .

» Avec des pièces conductrices faisant fonction d'amortisseur, le flux émis par les faces latérales des dents ne pourra pas varier. Du fait des courants d'amortissement on peut dire qu'il se fixera à la valeur moyenne $\frac{\varphi + \psi}{2}$.

» Le flux oscillera donc cette fois entre les valeurs

$$(\Phi + \varphi + \psi) \quad \text{et} \quad 2(\varphi + \psi).$$

» Si dans une première approximation nous supposons d'après les figures $\psi = 2\varphi$ on trouve que, sans amortisseur, le flux oscille entre les valeurs $(\Phi - 2\varphi)$ et 8φ et que, avec amortisseurs, le flux oscille entre les valeurs $(\Phi + 3\varphi)$ et 6φ .

» Dans le premier cas la variation de flux est $\Phi - 6\varphi$ et dans le second cas $\Phi - 3\varphi$.

» On se rendrait compte par une application numérique de l'amélioration notable introduite par les amortisseurs.

» Au point de vue du débit $I \sin \omega t$ les amortisseurs ont encore un effet très important. Ils diminuent le flux de réaction et les pertes qu'il occasionne. On démontre qu'il n'existe comme flux alternatif de réaction possible que celui qui correspond au flux d'entrefer Φ proprement dit. En effet, le flux variable émis par la face des dents est de la forme

$$\frac{\psi + \varphi}{2} \sin(\omega t - \alpha) + \frac{\psi - \varphi}{4} [1 - \cos(2\omega t - \alpha)].$$

» Son caractère alternatif fait qu'il est totalement annulé par les amortisseurs. La partie continue du flux n'occasionne pas de pertes.

» Les machines à réluctance variable peuvent donner lieu à une multiplication de la fréquence analogue à celle réalisée dans les machines à pôles alternés par l'alternateur Goldschmidt. Il suffit d'avoir en mémoire le deuxième théorème de M. Boucherot (*Lumière électrique* du 4 mars 1893, p. 500), à savoir que « dans une » machine à pôles non alternés l'inducteur et l'induit sont le siège » de courants représentés par tous les termes *pairs* et *impairs* de » la série de Fourier ».

» Par cette voie la machine à réluctance variable peut donner les fréquences les plus élevées sans vitesse périphérique excessive.

» Ainsi, au point de vue du doublage de la fréquence, le débit d'un courant $I \sin \omega t$ donne lieu à un flux de réaction :

$$\frac{I\Phi}{2} \sin \omega t - \frac{I\Phi}{4} [1 - \cos(2\omega t - \alpha)]$$

qui fait apparaître la tension de fréquence double

$$\frac{\omega I\Phi}{2} \sin(2\omega t - \alpha).$$

» Dans une machine à réluctance variable, on peut travailler assez loin de la saturation pour dire encore que le rendement est indépendant de la surcharge comme dans les machines en cascade. Si l'on suppose alors que les pertes électriques à vide dues à la production de la tension ν de la machine et celles dues au débit en charge I se superposent simplement par suite de la mise en quadrature du flux de réaction et du flux générateur de la tension ν grâce à l'intercalation d'une capacité appropriée en série avec l'induit, on aura manifestement le meilleur rendement lorsque les pertes dues au débit seront égales aux pertes à vide.

» En effet, la puissance disponible est égale à νI et l'expression des pertes est de la forme $k'\nu^2 + k''I^2$.

» *Machines à utilisation partielle de la périphérie.* — La difficulté que l'on rencontre à construire une machine usuelle à pôles alternés ou homopolaire pour de très hautes fréquences, sans augmenter la vitesse périphérique, consiste dans l'impossibilité pratique où l'on se trouve de loger le bobinage dans les encoches, devenues trop étroites. Ainsi avec 150 m de vitesse périphérique le pas polaire est, pour 30 000 périodes, de 2,5 mm. En réservant 2 mm seulement pour la largeur des dents il ne reste que $\frac{5}{10}$ pour l'encoche. Mais on peut alors songer à ne disposer sur une machine qu'une

fraction des pôles nécessaires, quitte à combiner plusieurs machines pour distribuer entre elles la totalité des pôles. Ainsi au lieu d'une seule machine on peut considérer un système de trois machines I, II, III (voir *fig. 12*) dans lequel la succession des pôles se fait

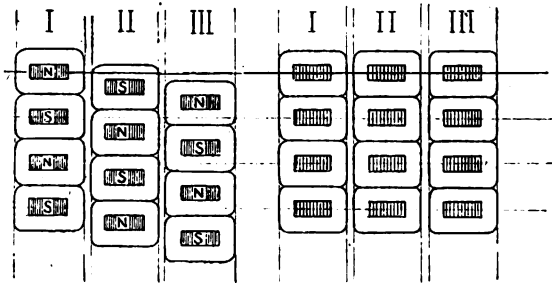


Fig. 12.

en passant d'une machine à l'autre et en omettant deux pôles sur trois dans chaque machine. La place restée disponible par les pôles absents permet alors de loger plus facilement le bobinage. La figure 12, qui représente à gauche les rotors et à droite les stators de trois machines, est assez explicite à cet égard. Un premier pôle nord étant disposé sur la machine I, le pôle sud suivant est disposé sur la machine II, le deuxième pôle nord est disposé sur la machine III et le deuxième pôle sud revient sur la machine I et ainsi de suite. Dans chaque rotor on a omis deux pôles sur trois. Dans les trois stators en regard on a omis également deux dents sur trois.

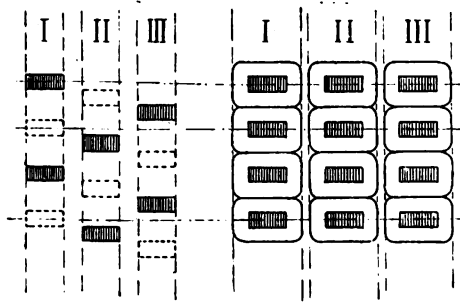


Fig. 13.

» Cette disposition est générale et s'applique aussi bien aux machines homopolaires et à la machine à impédance variable de la figure 7.

» Dans ces dernières il n'y a pas de bobinage d'excitation sur

le rotor et l'on doit considérer simplement que les intervalles vides remplacent des pôles de signe opposé. La figure 13 se rapporte au cas des machines homopolaires, la figure 14 se rapporte au cas de la machine à réluctance variable de la figure 7.

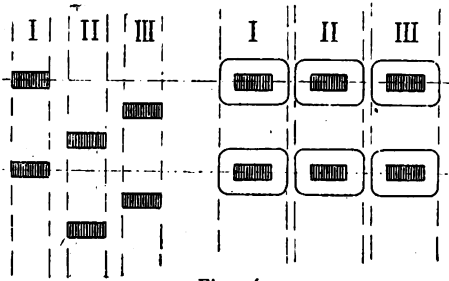


Fig. 14.

» En réalité, en distribuant aussi simplement les pôles d'une seule machine dans trois machines, on suppose en première approximation que, l'entrefer étant infiniment petit, le flux émis par chaque pôle inducteur se concentre sur la largeur du pôle dans l'entrefer et l'on néglige le flux qui peut être émis par les faces latérales des pôles dès que ces faces sont dégagées. Or ce dernier flux peut être considérable et, dans ces conditions, on doit dire que, en dehors de la fréquence qui résulte de la combinaison des trois machines, chaque machine donne essentiellement une fréquence fondamentale qui est le $\frac{1}{3}$ de la fréquence donnée par leur combinaison. Ceci revient à dire que la disposition de pôles étroits comme représenté sur les figures 12, 13, 14 donne lieu dans chaque machine à l'harmonique 3 et que cet harmonique est mis en évidence par la mise en série de trois machines décalées de $\frac{2\pi}{3}$.

L'idée de faire apparaître des harmoniques dans les machines pour obtenir une haute fréquence est ancienne et remonte à Max Wien (1902). L'avantage de l'exposition que nous avons faite a été de nous permettre de préciser tout de suite ce que devait être la largeur des pôles pour obtenir le troisième harmonique.

» En réalité, on doit donc considérer que dans chaque machine, en dehors des pertes dues à la fréquence harmonique, il y a les pertes provenant de la fréquence fondamentale qui peuvent être beaucoup plus conséquentes.

» Mais la disposition de l'utilisation partielle de la périphérie peut n'intervenir que pour le stator si l'on fait glisser les trois machines de la figure 12 dans une seule et, dans ce cas, la fréquence fondamentale disparaît. Les stators se superposent et les rotors

décalés s'intercalent les uns dans les autres. Dans le cas de la machine homopolaire et de la machine à impédance variable, on aboutit aux dispositions représentées par les figures 15 et 16.

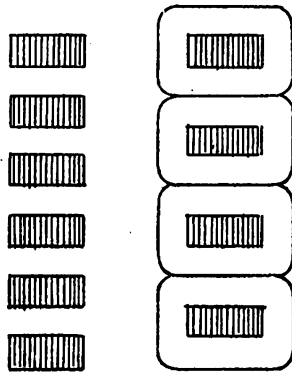


Fig. 15.

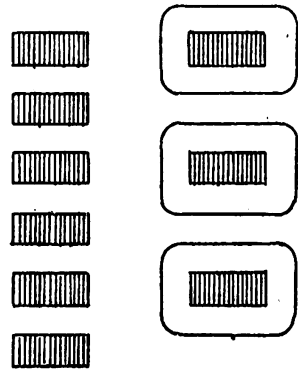


Fig. 16.

Elles reviennent à établir des machines dans lesquelles la polarité du rotor est triple de celle du stator; la fréquence est alors déterminée par la polarité du rotor.

» Les figures 17 et 18 représentent les profils du stator et du rotor

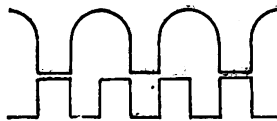


Fig. 17.

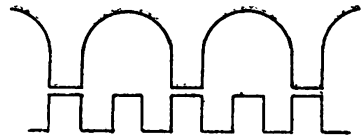


Fig. 18.

dans le cas de la machine homopolaire et de la machine à impédance variable.

» M. Bethenod et son assistant M. Billieux ont exécuté des machines homopolaires suivant le principe que nous venons d'indiquer. Le rotor est feuilleté et construit suivant une disposition qui avait été antérieurement prévue pour la machine à impédance variable suivant la figure 7 d'abord préconisée par M. Bethenod.

» Les études sur les machines à haute fréquence ont été poursuivies en France pendant la guerre sur la demande du colonel Ferrié qui s'est toujours intéressé à la question depuis 1904.

» Toutes les solutions ont été successivement envisagées et nous avons le sentiment que, à l'instigation de la Télégraphie militaire, cette question a été traitée absolument à fond et presque définitivement dans notre pays. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Marius Latour.

PROJET DE RÈGLEMENT INTÉRIEUR D'ADMINISTRATION.

I. — Cotisations.

1. La cotisation annuelle est de 25 francs (art. 3 des Statuts).
2. Elle est due par tous les Membres, sauf les Membres d'honneur.
3. Le paiement de la première cotisation doit être effectué par chaque Membre nouveau, immédiatement après son admission. La cotisation de l'année en cours est due, quelle que soit la date de l'admission.
4. Le paiement des cotisations suivantes devra être effectué du 1^{er} janvier au 30 juin.
5. Les quittances seront détachées d'un registre à souche et signées du trésorier.
6. En cas de non-paiement d'une cotisation échue et réclamée, l'envoi des publications est suspendu.
7. Tout Membre en retard de deux années pour le paiement de ses cotisations sera, après un dernier avertissement, considéré comme ne faisant plus partie de la Société.
8. Toute démission donnée ne sera valable qu'après acquittement des cotisations dues; sinon la radiation sera prononcée.
9. Les Membres peuvent se libérer de toute cotisation moyennant le paiement d'une somme de 375 francs, effectué soit en un versement, soit en deux versements annuels de 187,50 francs pendant deux années consécutives, soit en trois versements de 125 francs, pendant trois années consécutives.
Dans le cas où ils cesseraient de faire partie de la Société avant le versement de la totalité des annuités précédemment indiquées, les versements effectués demeureraient acquis à la Société.

II. — Elections.

10. Les élections pour le renouvellement du Bureau et du Comité ont lieu tous les ans, lors de la réunion de l'Assemblée générale ordinaire.
11. Tous les Membres de la Société sont appelés à prendre part aux élections, soit par le dépôt direct de leur vote, soit par correspondance.
12. Les votes par correspondance devront être parvenus au siège de la Société la veille, au plus tard, de la réunion de l'Assemblée générale ordinaire. Le bulletin de vote devra être adressé au Président de la Société, sous double enveloppe fermée et signée du sociétaire.
13. Ces bulletins seront joints aux bulletins déposés directement par les Membres

présents à l'Assemblée générale. Le dépouillement aura lieu séance tenante, sous la surveillance de deux Membres du Bureau; le résultat en sera proclamé immédiatement.

14. Le Comité se réunit en temps utile pour discuter les titres des candidats et fait connaître les noms qu'il propose au choix de la Société dans la réunion mensuelle qui précède l'Assemblée générale.

15. Le Président, le Secrétaire général et le Trésorier ne peuvent être pris que parmi les Membres nationaux ayant leur résidence à Paris.

III. — Assemblées générales.

16. L'Assemblée générale ordinaire a lieu tous les ans, au mois de mars ou d'avril.

17. L'Assemblée générale procède à l'élection des Membres du Bureau, du Comité et de la Commission des comptes. Le Président, nommé une année à l'avance, prend part aux travaux du Bureau en fonction.

Elle vote sur les questions d'intérêt général ou de règlement intérieur portées à son ordre du jour.

18. Les décisions sont prises à la majorité relative; en cas de partage des voix, la voix du Président est prépondérante.

19. L'ordre du jour de l'Assemblée générale est arrêté par le Comité. Aucune question en dehors de cet ordre du jour ne peut être introduite devant l'Assemblée générale.

20. Les Membres de la Société qui désireraient faire porter une proposition à l'ordre du jour de l'Assemblée générale doivent, quinze jours avant sa réunion, en envoyer le texte au Président, qui en donne communication au Comité.

21. Les Rapports du Comité d'administration, de la Commission des comptes, ainsi que l'ordre du jour de l'Assemblée générale arrêté par le Comité, sont déposés au secrétariat dix jours au moins avant la réunion de l'Assemblée générale, à la disposition de tous les Membres qui désireraient en prendre connaissance.

22. Le Comité peut convoquer une Assemblée générale extraordinaire toutes les fois qu'il le juge nécessaire.

L'Assemblée générale extraordinaire est convoquée dans la même forme et délibère sous les mêmes conditions que l'Assemblée générale ordinaire, conditions réglées par les articles 8, 10, 11, 15, 16 et 17 des Statuts et l'article 19 du présent Règlement.

IV. — Comité.

23. Les attributions du Comité sont réglées par l'article 6 des Statuts.

24. Les procès-verbaux des séances du Comité sont transcrits sur un registre spécial folioté. Après son adoption, chaque procès-verbal est revêtu de la signature du Président et du Secrétaire-rédacteur.

25. L'ordre du jour des séances du Comité est indiqué dans les lettres de convocation.

V. — Bureau.

26. Le Président préside toutes les réunions de la Société et du Comité.

Il est Président de droit de toutes les Commissions.

27. Le Secrétaire général organise les séances de la Société, prépare les travaux du Comité, dirige les publications. Les dépenses sont mandatées par lui. Il a sous ses ordres, par délégation du Président, les agents rétribués de la Société.

28. Le Trésorier est l'agent délégué du Comité d'administration pour la gestion financière.

Il effectue les recettes et dépenses, les mouvements de fonds, achats et ventes de titres et représente la Société en justice et dans tous les actes de la vie civile, le tout en se conformant aux décisions prises par le Comité.

29. Le Comité nomme un secrétaire pris hors de son sein et auquel il est attribué une indemnité en rémunération de ses services.

Le secrétaire du Comité rédige les procès-verbaux de l'Assemblée générale, des réunions mensuelles du Comité et des Commissions et veille à la transcription, sur les registres spéciaux, des procès-verbaux approuvés.

Il a la garde des archives.

Il surveille les impressions, l'envoi des convocations, la distribution des bulletins.

Il prête son concours au Trésorier pour la perception des cotisations et le payement des factures, des loyers et des traitements.

VI. — Réunions ordinaires.

30. Les réunions ordinaires ont lieu le premier mercredi de chaque mois, les mois d'août, de septembre et d'octobre exceptés.

Elles sont principalement consacrées aux Communications relatives à l'Électricité, présentées soit par des Membres de la Société, soit par des personnes étrangères autorisées.

L'ordre du jour de la séance est réglé par le Bureau.

31. Il y est voté à mains levées sur l'admission des Membres nouveaux.

32. Le Président y rend compte des travaux et des décisions du Comité, et, en général, de toutes les questions pouvant intéresser la Société.

33. Tout Membre désirant faire une proposition doit en remettre le texte par écrit au Président, autant que possible avant la séance.

Si, de l'avis du Bureau, la motion est de nature à engager la responsabilité morale ou financière de la Société, elle est renvoyée de droit au Comité sans qu'elle puisse donner lieu à une discussion dans la réunion.

VII. — Bulletin.

34. Un Bulletin périodique rend compte des travaux de la Société et donne connaissance des Communications faites en séance mensuelle.

Le Bureau prononce sur l'admission de ces Communications ou de leurs résumés et sur l'étendue qui peut leur être accordée.

- 33. Le Bulletin est envoyé gratuitement à tous les Membres.
- 36. Des abonnements peuvent être consentis à un prix fixé par le Comité.
- 37. Les échanges de publications doivent être autorisés par le Comité.

VIII. — Laboratoire central d'Électricité.

38. Le Laboratoire central d'Électricité a pour objet de :
- 1° Réunir et conserver une série d'étalons de toutes les grandeurs électriques;
 - 2° Former une bibliothèque aussi complète que possible des ouvrages français et étrangers traitant d'Électricité;
 - 3° Étalonner des appareils de mesure appartenant à des tiers;
 - 4° Déterminer les constantes d'appareils électriques industriels : piles, accumulateurs, dynamos, lampes, etc.;
 - 5° Étudier des appareils nouveaux ou des méthodes nouvelles ayant trait à l'Électricité;
 - 6° Faciliter des études et des recherches personnelles sur le même sujet.
39. Le fonctionnement du Laboratoire central d'Électricité est régi par un Règlement spécial.

IX. — École supérieure d'Électricité.

40. L'École supérieure d'Électricité a pour objet de donner aux ingénieurs les connaissances théoriques et pratiques qu'exige l'emploi de l'électricité dans l'industrie.
41. Le fonctionnement de l'École supérieure d'Électricité est régi par un Règlement spécial.



IL Y A TRENTE ANS.

Février 1889. — Sur la valeur industrielle et économique des machines dynamo-électriques, par M. R. ARNOUX. — La lumière électrique dans les fanaux de la Marine, par M. J. REY. — Sur la réalisation des diagrammes électriques en Électrostatique, par M. A. PERRIN. -- Description du service horaire de la ville de Lyon, par M. Ch. ANDRÉ.



BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.

SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.



LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)
PARIS 30 FR. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE . . 32 FR.
Prix du numéro : 3 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de poste.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS,
LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs. Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits.

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au **BOURGET** (Seine) et à **LYON**.

Agences à **BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES**

TURBINES A VAPEUR

Pour la *Commande de :*

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines
installées en **France**
par la **Compagnie Electro-Mécanique**
et ses Licenciés,

plus de 1.200.000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

[Stations Centrales.]

Transports de Force.

**Traction électrique par courant
continu et par courant alternatif.**

Éclairage électrique des trains.

**Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.**

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminaires.

**Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.**

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

FILS ET CABLES

POUR L'ÉLECTRICITÉ

R. ALLIOT & ROL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

38, rue de Reuilly, 38

PARIS

TÉLÉPHONE

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET C^e.

QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55, A PARIS (6^e).

**THOMSON (J.-J.). — Passage de l'Électricité à travers
les gaz.** Traduit d'après la 2^e édition anglaise
par R. FRIC, Ancien Elève de l'Ecole supérieure
d'Electricité, et A. FAURE, Ancien Elève de l'Ecole
Polytechnique. In-8 (25-16) de x-694 pages avec
209 figures; 1912..... 24 fr.

**TURPAIN (Albert). — Notions fondamentales sur la
Télégraphie envisagée dans son développement,
son état actuel et ses derniers progrès (Du Bré-
guet au Pollak et Virag et aux téléphotographies).**
(BIBLIOTHÈQUE DE L'ÉLÈVE INGÉNIEUR). In-8 (25-16).
de 180 pages avec 122 figures; 1910. 5 fr.

BIBLIOTHÈQUE TECHNOLOGIQUE

LEÇONS SUR LE FONCTIONNEMENT

DES

GROUPES ÉLECTROGÈNES EN RÉGIME TROUBLÉ

PERTURBATIONS, RÉGULATION, ASSERVISSEMENT, COMPENSATION

Par L. BARBILLION,

Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble, Directeur de l'Institut Electrotechnique.

VOLUME IN-8 (23-14) DE VI-300 PAGES, AVEC 166 FIGURES, CARTONNÉ; 1915..... 11 FR.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 5 mars 1919 : Admission de Membres titulaires, p. 122.
— Membres décédés, p. 122. — Liste des candidats pour le renouvellement partiel du Bureau et du Comité, p. 122. — Revision du règlement intérieur, p. 124. — Don de M. et M^{me} Cohen. Fondation Édouard Cohen, p. 124. — Souscription pour la chaire d'Électrotechnique générale, p. 124. — Note sur l'enseignement de la T. S. F. à l'École supérieure d'Électricité, p. 124. — Expérience actuellement acquise dans l'électrification des grandes lignes de chemins de fer (M. Mauduit), p. 127. — Sur les machines électriques à haute fréquence et leur réglage (M. J. Bethenod), p. 161. — Tarif du Laboratoire central d'Électricité, p. 177.

IL Y A TRENTE ANS, p. 196.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 5 mars 1919 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. A. LARNAUDE.

La séance est ouverte à 20 h 35 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Belmère (Raymon-Alfred), Ingénieur, chef de quart, Station radiotélégraphique du Champ de Mars, 187, rue de Grenelle, à Paris. — Présenté par MM. Bizet et Gourdeau.

Conge (Louis-Eugène), Ingénieur de la Compagnie Lorraine d'Électricité, 64, faubourg Stanislas, à Nancy. — Présenté par MM. Drouin et Pirani.

Demengeot (Albert-Charles), Directeur de l'usine du Loreïd, à Vitry-sur-Seine, 24, avenue Joseph-Froment, La Garenne-Colombes (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et Delamare.

Gruintgens (Marcel-Paul), Sous-Lieutenant au 8^e Génie (Service radio de l'Afrique du Nord), 82, boulevard des Batignolles, à Paris. — Présenté par MM. P. Janet et Chaumat.

Janculesco (Constant), Ingénieur à la Compagnie française Thomson-Houston, 3, rue Sextius-Michel, à Paris. — Présenté par MM. P. Janet et Chaumat.

Miéville (Charles), Ingénieur, Chef de service à la Compagnie électro-mécanique, 1, rue de Pontoise, à Paris. — Présenté par MM. Desombre et Schwarberg.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société.

M. le PRÉSIDENT fait part en ces termes du décès de M. *Devaux-Charbonnel* :

« C'est avec une profonde émotion que je viens vous annoncer le décès de notre Président désigné, M. Devaux-Charbonnel, dont les obsèques ont eu lieu ce matin.

» M. Devaux-Charbonnel est, on peut le dire, une des dernières victimes de la guerre. Surmené par un labeur écrasant, notre collègue était depuis quelques mois dans un état de fatigue tel qu'il n'avait pas pu suivre nos réunions.

» Nous qui le connaissions, qui savons avec quelle activité et quelle conscience il remplissait les importantes fonctions dont il était chargé, nous pouvons dire qu'il a bien mérité de la Patrie.

» Je m'incline respectueusement devant sa mémoire, et en votre nom, j'adresse à nouveau à sa famille les condoléances émues et sincères de la Société française des Électriciens. »

M. le PRÉSIDENT, conformément aux prescriptions du règlement intérieur, donne connaissance de la liste des candidats que le Comité propose aux suffrages de l'Assemblée générale, savoir :

Membres d'honneur :

MM.

BENOIT (R.), ancien Directeur du Bureau international des Poids et Mesures.

THURY (R.), Ingénieur-Conseil de la Compagnie « l'Industrie électrique et mécanique ».

Président

pour l'exercice 1919-1920 :

MAZEN (N.), Ingénieur en Chef du matériel et de la traction des Chemins de fer de l'État.

Président

pour l'exercice 1920-1921 :

ABRAHAM (H.), Professeur à la Sorbonne, délégué à l'École Normale supérieure.

Vice-Présidents :

ESCHWÈGE (P.), Directeur de la Société d'éclairage et de force par l'électricité.

GRATZMULLER (L.), Ingénieur-Conseil.

Secrétaires :

PISTOYE (H. DE), Ingénieur en chef des Services électriques de la Société « l'Éclairage électrique ».

SAGET (J.), Ingénieur de la Maison Gallot et C^{ie}.

Trésorier :

BROcq (F.), Directeur de la Compagnie pour la fabrication des compteurs.

Membres :

ARMAGNAT (H.), Ingénieur-Conseil.

ARNOUX (R.), Ingénieur-Constructeur.

BETHENOD (J.), Ingénieur-Conseil.

CORNUAULT (A.), Sous-Directeur de la Compagnie continentale des Compteurs.

COURTOIS (G.), Directeur de l'Usine des constructions électriques de la Société industrielle des Téléphones.

DAVID (CH.), Ingénieur-Conseil.

DESAUGEY (E.), Ingénieur civil des Mines.

DUVAL (CH.), Ingénieur.

FÉRY (CH.), Professeur à l'École de Physique et de Chimie de la Ville de Paris.

GOURDEAU (G.), Ingénieur des Ateliers de constructions électriques du Nord et de l'Est.

GUÉRY (F.), Ingénieur, Chef des Services électriques de l'Omnium lyonnais.

JOUAUST (R.), Chef des Travaux du Laboratoire central d'Électricité.

LAPORTE (F.), Sous-Directeur du Laboratoire central d'Électricité.

LECLER (H.), Ingénieur des Arts et Manufactures.

LEGOUËZ (R.), Administrateur de la Société Parisienne pour l'Industrie des Chemins de fer et des Tramways électriques.

MEYER (MARCEL), Directeur de la Compagnie générale des Travaux d'éclairage et de force.

NEU (L.), Ingénieur-Conseil.

VALBREUZE (R. DE), Administrateur-Délégué des Anciens Établissements Deberghe et Lafaye.

Commission des Comptes pour 1919-1920 :

FRANCE (E. DE), Sous-Directeur commercial de la Compagnie Thomson-Houston.

LAURIOL (P.), Ingénieur en chef des Services d'éclairage de la Ville de Paris.

MONMERQUÉ (A.), Inspecteur général des Ponts et Chaussées.

M. le PRÉSIDENT fait connaître que l'Assemblée générale aura à se prononcer sur les modifications du règlement intérieur de la Société conformément au texte du nouveau règlement paru dans le *Bulletin* de février 1919.

M. le PRÉSIDENT fait part d'un don de 250 fr de rente fait à la Société française des Électriciens par M. et M^{me} Cohen, en mémoire de leur fils *Edouard Cohen* mort au champ d'honneur. Les $\frac{2}{3}$ de ce revenu seront employés à l'achat de livres techniques en faveur d'un élève sortant diplômé de l'École supérieure d'Électricité. Les $\frac{1}{3}$ restants seront versés à la Société amicale des Ingénieurs diplômés de l'École, avec affectation spéciale à sa caisse de crédit d'études.

M. le PRÉSIDENT fait connaître qu'il a reçu pour la chaire d'Électrotechnique générale les souscriptions suivantes :

Compagnie française Thomson-Houston.....	2500 ^{fr}
Compagnie française pour la fabrication des lampes électriques à incandescence.....	1000
Compagnie générale d'Électricité.....	1000

Il adresse aux donateurs les remerciements de la Société française des Électriciens.

M. le PRÉSIDENT. — « L'École supérieure d'Électricité rouvrira sa Section de Télégraphie sans fil le 17 mars 1919, avec le concours de l'Université de Paris et de la Télégraphie militaire.

» Cette session est spécialement destinée aux officiers américains actuellement présents à Paris et aux officiers français délégués par les Ministères de la Guerre, de la Marine et des Colonies.

» L'enseignement comprendra :

» 1^o Un cours théorique et expérimental de 20 à 25 leçons sur la T. S. F., professé à la Sorbonne par M. A. Abraham, professeur à l'Université de Paris. Ce cours sera public et commencera le vendredi 21 mars à 14 h 30 m.

» 2^o Un enseignement de révision (cours et travaux pratiques) sur l'Électrotechnique générale, les mesures et les moteurs thermiques, à l'École supérieure d'Électricité. Cet enseignement, d'une durée de 3 semaines, commencera le lundi 27 mars à 14 h 30 m.

» 3^o Une série de 60 conférences environ sur la technique de la télégraphie sans fil et sur des sujets spéciaux se rapportant à la

T. S. F. Cet enseignement sera placé sous la haute direction de M. le Colonel Ferrié et confié à environ 15 à 20 spécialistes particulièrement désignés par leurs travaux antérieurs.

» Ces conférences auront lieu les mardis, mercredis, jeudis et samedis dans l'après-midi à l'École supérieure d'Électricité à une date qui sera indiquée ultérieurement.

» 4^o Des travaux pratiques de T.S.F sous la haute direction de M. le Colonel Ferrié. Ces travaux pratiques auront lieu aux Invalides. Des auditeurs libres peuvent s'inscrire pour suivre la série des conférences spéciales de T.S.F. moyennant le versement d'une somme de 300 fr.

» Aucune inscription ne peut être acceptée pour les travaux pratiques.

» Il est à prévoir qu'en présence des demandes qui nous arrivent, une autre session pourra s'ouvrir l'automne prochain. »

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

**PROGRAMME D'ÉLECTRIFICATION PARTIELLE DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS :
EXPÉRIENCE ACTUELLEMENT ACQUISE EN FRANCE ET A L'ÉTRANGER DANS
L'ÉLECTRIFICATION DES GRANDES LIGNES ;**

PAR M. A. MAUDUIT.

Professeur d'Électrotechnique à l'Université de Nancy.

**I. — PROGRAMME D'ÉLECTRIFICATION PARTIELLE
DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS.**

L'intérêt principal de l'électrification partielle du réseau ferré français réside dans l'économie de charbon qui résultera de la substitution de l'énergie des chutes d'eau à celle de la houille pour la traction des trains.

La France consommait, avant la guerre, 60 millions de tonnes de charbon et en produisait seulement 40 millions, d'où un excédent de consommation de 20 millions de tonnes qui, au prix moyen de 20 fr la tonne, correspondait à un tribut de 400 millions à payer chaque année à l'étranger.

D'après les statistiques officielles, la consommation de charbon pour la traction des grands réseaux français, y compris la grande et la petite Ceinture, a été, pendant l'année 1913, de 176 millions de francs, soit environ 7 millions de tonnes, en chiffres ronds, en comptant le charbon sur tender au prix moyen de 25 fr la tonne. On peut admettre que d'ici un délai approximatif de vingt ans, le trafic et avec lui la consommation de charbon seront doublés.

En vue d'étudier le problème de l'électrification des grandes lignes, un Comité a été constitué en novembre dernier, au Ministère des Travaux publics et des Transports, sous la présidence de M. G. Cordier, Président du Conseil de la Société d'Énergie électrique du Littoral méditerranéen. Ce Comité, comprenant des délégués des six grands réseaux, de l'Administration et de l'Industrie, a immédiatement commencé ses travaux et nommé deux sous-commissions, l'une dite *administrative*, présidée par M. Mussat, Directeur du contrôle du matériel roulant des grands réseaux, chargée d'examiner spécialement le programme d'électrification des trois réseaux intéressés, Midi, Orléans et P.-L.-M., et l'organisation des usines destinées à produire l'énergie hydro-électrique nécessaire; l'autre dite *technique*, sous la présidence de M. Monmerqué, bien

connu de tous ses collègues de la Société française des Électriciens, chargée d'étudier les divers systèmes actuellement utilisés pour la traction électrique des grandes lignes et, si possible, de faire choix d'un mode de traction unique pour les trois réseaux considérés, afin qu'un locomoteur d'un réseau quelconque puisse circuler et fonctionner sur tout l'ensemble des voies des grandes lignes électrifiées.

Pour les lignes de banlieue, la traction électrique s'est imposée tout d'abord par suite de la grande augmentation de capacité de transport donnée aux installations disposant seulement d'une surface limitée et aussi de la suppression des fumées nuisibles à l'hygiène et à la propreté. L'électrification est déjà commencée pour la banlieue de Paris et le projet complet est en cours d'exécution en ce qui concerne les chemins de fer de l'Etat. Il serait évidemment utile d'envisager l'électrification du reste du réseau de la banlieue, sans oublier la petite Ceinture, mais nous n'avons pas connaissance que des projets aient été proposés à ce sujet.

Le problème de l'équipement électrique des lignes de banlieue ne comporte aucune difficulté technique : l'expérience a montré que le système à courant continu, à 600 volts, avec troisième rail, donne toute satisfaction ; la question est d'ordre purement économique et financier.

Laissant de côté l'électrification de la banlieue qui n'est pas du ressort propre du Comité, quelle que soit d'ailleurs son importance, la Sous-Commission administrative a procédé à l'examen du programme d'électrification des trois réseaux intéressés et approuvé ce programme, qui a été tracé en tenant compte des propriétés caractéristiques de la traction électrique.

On sait que les lignes les plus intéressantes à électrifier sont celles qui présentent à la fois un profil accidenté et un trafic important. Sur ces lignes, la traction électrique permet de réaliser une augmentation considérable de la capacité de transport, ce qui, dans certains cas, peut occasionner une grande économie de première installation, en évitant le doublement onéreux de certaines voies simples ; l'exploitation est d'ailleurs moins onéreuse qu'avec la vapeur.

En ce qui concerne les lignes présentant, soit un profil moins accidenté, soit un trafic plus réduit, l'expérience acquise est encore trop peu importante pour qu'il soit possible de fixer les limites à partir desquelles la traction électrique cesse d'être plus économique que la traction à vapeur : le critérium repose sur la quantité de charbon consommée par kilomètre de voie et dépend des frais

d'installation et d'exploitation du système de traction électrique adopté.

Le programme d'électrification adopté demanderait pour son exécution un délai d'une vingtaine d'années; il comprend environ 8200 km de route répartis comme il est indiqué ci-dessous. La Compagnie du Midi est d'ailleurs déjà entrée dans la voie de l'électrification et possède environ 150 km de lignes à traction électrique.

Réseau du Midi. — Environ 3000 km, comprenant l'ensemble du réseau, sauf la ligne plate Bordeaux-Cette et les petites lignes plates affluentes : en plus des lignes des Pyrénées et des Cévennes, la ligne plate à grand trafic Bordeaux-Hendaye est comprise dans le programme d'électrification.

Réseau d'Orléans. — Environ 3000 km, comportant toutes les lignes du plateau central, comprises dans le triangle allongé limité par le P.-L.-M., et les lignes de Saint-Sulpice-Laurière à Moulins d'une part et à Toulouse par Figeac d'autre part, la grande ligne de Châteauroux à Montauban, les lignes d'Angoulême à Limoges, et de Limoges-Périgueux-Agen, ainsi que quelques lignes reliant cette dernière au triangle mentionné plus haut.

Réseau du P.-L.-M. — Environ 2200 km, savoir : la ligne de montagne Nîmes à Langogne, dont la capacité accrue par l'électrification permettrait de soulager considérablement la grande ligne Paris-Marseille, les lignes de montagne Lyon à Genève, Culoz à Modane, où aboutit une ligne électrique italienne, et Montméliau à Marseille par Grenoble et Veynes, ligne aux déclivités très importantes, la ligne à grand trafic Lyon à Marseille, et les lignes de Marseille à Vintimille et de Tarascon à Cette.

On estime que l'économie de charbon réalisée par suite de l'électrification de ces 8200 km de lignes (environ le cinquième du réseau français) serait de 1,5 million de tonnes au trafic de 1913, et par suite de 3 millions de tonnes, au trafic que l'on peut espérer double en 1940 : la consommation d'énergie correspondante aux usines dépendra du système employé, mais peut être évaluée environ à 1 milliard de kilowatts-heure au trafic de 1913 et 2 milliards de kilowatts-heure en 1940.

La Compagnie du Midi a en fonctionnement, en cours d'exé-

cution ou en projet, les usines hydrauliques nécessaires à l'alimentation en énergie de son futur réseau électrifié :

En fonctionnement, les usines de Soulom, la Cassagne et Fontpédrouse;

En exécution, l'usine d'Eget;

En projet, les usines des vallées d'Ossau et de la Têt dans les Pyrénées et d'Aumessas, dans les Cévennes.

La Compagnie d'Orléans envisage l'exécution d'un certain nombre d'usines sur la Haute Dordogne et ses affluents, susceptible de fournir toute l'énergie nécessaire à ses besoins, au moins pendant une grande partie des 20 années que demandera l'établissement du réseau électrifié.

Le P.-L.-M. étudie l'équipement d'une usine au Mont Lozère, pour desservir principalement sa ligne de Nîmes à Langogne et se préoccupe de s'assurer dans les Sociétés de distribution d'énergie les participations suffisantes pour réaliser l'alimentation électrique des autres lignes.

La Sous-Commission administrative a examiné tous les problèmes de fourniture d'énergie, en s'inspirant de ce double but : donner aux Compagnies de chemin de fer les moyens d'assurer la sécurité des transports dont elles sont responsables et prendre toutes précautions pour que toute l'énergie disponible sous forme de houille soit utilisée sans gaspillage avec le meilleur rendement.

Elle a également fait une évaluation approximative des capitaux nécessaires pour l'exécution du programme complet; la dépense totale, y compris les travaux d'installation fixe sur les voies, les locomoteurs et les usines, s'élève à environ 3 milliards et demi, en admettant, pour les prix moyens de la période d'une vingtaine d'années à venir, une majoration de 100 pour 100 sur les prix de 1913. Il faut d'ailleurs remarquer qu'une certaine partie de cette somme, le tiers environ, correspondant au matériel tracteur, ne représente pas une dépense imputable à l'électrification, puisque les tracteurs électriques remplaceront des locomotives à vapeur, qui auraient coûté sensiblement le même prix et qu'une certaine partie de la dépense d'établissement des centrales comportera des travaux de régularisation de rivières, utiles à la fois à l'industrie d'aval à l'agriculture, éventuellement même à la navigation.

A l'heure actuelle, ce programme d'électrification, portant sur 8200 km, tel qu'il a été indiqué plus haut, ne peut évidemment être considéré que comme un avant-projet, susceptible de servir de

guide pour les travaux futurs : les conditions techniques et économiques relatives au système de traction électrique choisi, les circonstances diverses de développement du trafic sur les différentes lignes, et la plus ou moins grande facilité de réunion des capitaux nécessaires à cette vaste entreprise influenceront évidemment, dans de larges limites, sur l'ordre et l'importance même des électrifications réalisées.

Étant donné le grand développement envisagé pour les lignes électrifiées sur les trois réseaux voisins, il a paru au Comité qu'il serait très important, si possible, de voir les trois réseaux adapter un même type de distribution de courant aux tracteurs, afin qu'un locomoteur électrique d'un réseau quelconque puisse circuler sur l'ensemble des lignes françaises électrifiées.

Indépendamment de l'abaissement probable des dépenses d'installation, cette unification du courant de travail augmenterait la facilité de circulation, assurerait la commodité des manœuvres dans les gares et serait d'un grand intérêt pour l'exploitation d'ensemble des réseaux électrifiés en cas de mobilisation ou plus tard, lors du retour éventuel des chemins de fer à l'Etat, enfin des concessions accordées aux Compagnies actuelles.

Aussi la Sous-Commission technique, comprenant des techniciens de l'Administration et des Compagnies, s'occupe-t-elle activement de réunir tous documents utiles, afin d'obtenir le plus tôt possible, un accord entre les intéressés sur le choix d'un système unique.

Une mission de techniciens a déjà visité en détail les installations de traction électrique d'Italie et de Suisse et une autre mission va partir incessamment pour les Etats-Unis étudier sur place des modes de traction qui ont reçu dans ce pays des applications importantes et n'existent pas en Europe.

L'auteur de cette Communication, rapporteur général du Comité d'Électrification, vient de terminer un long rapport, comprenant l'étude des systèmes de traction utilisés en Italie et Suisse, d'après les documents recueillis au cours du voyage de la mission déjà exécutée, et celle des systèmes américains, d'après la littérature technique, en attendant les résultats du voyage en Amérique de la seconde mission, en cours d'organisation.

La seconde partie de cette Communication sera consacrée à l'exposé sommaire des propriétés caractéristiques des divers systèmes de traction électrique actuellement utilisés : ces systèmes sont au nombre de trois, savoir, dans l'ordre de leur développement : le *triphasé*, le *monophasé* et le *continu à haute tension*.

Nous insisterons particulièrement sur le triphasé et le **monophasé direct**, dont nous avons pu faire une étude approfondie en Italie et en Suisse et dirons seulement quelques mots du **monotriphasé** (variante du monophasé) et du continu à haute tension, qui ont reçu des applications importantes en Amérique et n'existent pas en Europe.

II. — SYSTÈME TRIPHASÉ.

GÉNÉRALITÉS.

La traction électrique triphasée comporte l'emploi de deux lignes aériennes de contact, la troisième phase ayant pour conducteur le rail, généralement avec dérivation partielle du courant par le sol. Le courant est capté sur les lignes aériennes par deux archets juxtaposés. Les deux lignes de contact, présentant entre elles une différence de potentiel égale à la tension composée, doivent être soigneusement isolées l'une de l'autre; pour réaliser cet isolement, aux aiguillages et aux croisements, on supprime, en ces points particuliers, sur une certaine longueur, l'alimentation des lignes de contact. Pour que le courant ne soit pas coupé sur le locomoteur, au passage de ces sections, on utilise deux paires d'archet, une à chaque extrémité, de telle façon que l'écartement de ces deux systèmes d'archets soit supérieur à la longueur non alimentée de la section, et que, par suite, l'un au moins des deux systèmes reste en contact avec la distribution générale.

Les moteurs utilisés sont des *moteurs d'induction*, appelés aussi *moteurs à champ tournant* ou *moteurs asynchrones*; ces moteurs comportent un enroulement fixe ou stator, relié normalement aux phases du réseau, et un enroulement mobile ou *rotor* qui, tantôt est semblable à l'enroulement du stator et aboutit à trois bagues fixées sur l'arbre, et tantôt est formé par un enroulement très simple fermé en court circuit sur lui-même, souvent appelé alors *rotor à cage d'écureuil*.

Ces moteurs fonctionnent avec une vitesse sensiblement constante, qui ne dépend que de la fréquence du courant d'alimentation et reste la même, quelles que soient la tension du réseau, la déclivité de la ligne et la charge du train. Le glissement, différence entre la vitesse à pleine charge et la vitesse à vide, ou vitesse de synchronisme, est généralement compris entre 2 et 4 pour 100 de cette vitesse de synchronisme.

Pour obtenir une gamme de vitesses de régime (généralement

2 ou 4) on emploie soit l'accouplement en cascade de deux moteurs, soit un commutateur de nombres de pôles, soit les deux artifices combinés.

Dans le *montage en cascade* ou en *tandem* des deux moteurs, un seul des deux stators, celui du moteur primaire, est branché en dérivation sur le réseau; le rotor du moteur primaire est fermé sur un des deux enroulements du moteur secondaire, stator ou rotor, l'autre enroulement étant mis en court circuit. La vitesse normale est alors égale à la moitié de la vitesse de synchronisme des moteurs montés en parallèle; le couple maximum de chaque moteur reste légèrement inférieur à la moitié, et la puissance, au quart de leur valeur dans le moteur en fonctionnement normal; le facteur de puissance est également très affaibli.

Avec la variation du nombre de pôles, obtenue soit par modification du groupement des bobines, soit par emploi des deux enroulements différents, on réalise, pour chaque nombre de pôles, une vitesse de marche inversement proportionnelle à ce nombre.

Le démarrage et le passage d'une vitesse à une autre plus élevée se font : dans les moteurs avec rotors bobinés, en introduisant et supprimant des résistances entre les bagues des rotors (ou du rotor ou stator secondaire seulement, pour le groupement en cascade); dans les moteurs avec rotors en court circuit, utilisés seulement d'ailleurs sur un seul locomoteur du Simplon, en faisant varier la tension aux bornes des stators au moyen d'un auto-transformateur intercalé entre le réseau et ces stators.

A la descente des pentes, dès que l'action de la pesanteur dépasse l'effort nécessaire pour l'entraînement du train à la vitesse de synchronisme, le moteur d'induction se transforme automatiquement en génératrice et restitue au réseau une puissance en rapport avec le couple moteur; la vitesse de la génératrice dépasse alors le synchronisme de quelques centièmes seulement. C'est le fonctionnement dit en *récupération*, qui est automatique dans le moteur d'induction et qui présente le double avantage d'éviter l'usure des bandages de roue et des rails, et d'économiser une quantité notable d'énergie.

Pendant le fonctionnement en récupération, la génératrice absorbe, pour son excitation, le même courant magnétisant ou déwatté que pendant la marche en moteur; le courant watté seul change de sens, et dans un réseau où existent simultanément des moteurs en travail normal et des génératrices en récupération, la puissance utile, égale à la différence de la puissance absorbée et de la puissance récupérée, peut devenir très petite, tandis que la puissance

magnétisante ou réactive garde la même valeur, si bien que le facteur de puissance tombe alors à une valeur assez faible.

La traction électrique triphasée a été utilisée pour la première fois, dans les chemins de fer à voie normale, sur la ligne de Berthoud à Thoune (Burgdorf-Thun) 40 km, en Suisse. L'installation exécutée par la Maison Brown-Boveri de Baden, à 40 périodes et 750 volts composés, a été imitée de celles que ce constructeur avait faites en 1898 pour les lignes à voie étroite et crémaillère de la Jungfrau et du Gornergrat (40 périodes) et pour la ligne mixte de Stanstadt à Engelberg, 32 périodes; elle a été livrée à l'exploitation en juillet 1899 et fonctionne encore actuellement sous la forme même où elle a été inaugurée.

Quelques années plus tard, en 1901 et 1902, les lignes de la Valteline en Italie, Lecco-Colico, Sondrio et Colico-Chiavenna, au total 106 km, ont été équipées électriquement par la Société Ganz de Budapest, également en triphasé, mais sous la tension de 3000 volts environ et la fréquence de 15 périodes par seconde.

Vient ensuite (1906) l'électrification par la Société Brown Boveri, de la ligne du Simplon, de Brigue à Iselle, 22 km en triphasé et sous les mêmes conditions de tension et de fréquence.

Enfin les chemins de fer italiens, à partir de 1909, ont procédé successivement à l'équipement d'un certain nombre de tronçons de lignes, présentant des déclivités considérables et un trafic important, dont le total actuellement exploité en traction électrique triphasé, y compris les anciennes lignes de la Valteline, comporte un développement de 390 km de route et 650 km de voie simple.

En dehors de la Suisse et de l'Italie, il n'existe, ni en Europe ni en Amérique ⁽¹⁾ aucune application importante du système triphasé à la traction électrique des grandes lignes. A part la ligne de Berthoud Thoune, la première en date, équipée à 40 périodes et à 750 volts, toutes les autres installations sont du type à 3000 volts environ (3000 à 3700) et à 15 à 16,66 périodes par seconde.

Le choix de la tension a été dicté, par deux considérations : augmenter l'écartement des sous-stations en élevant la tension, mais se contenter d'une tension modérée, pour pouvoir brancher le primaire du moteur directement sur le réseau, sans interposition de transformateur.

(1) A l'exception du petit tronçon de montagne du Great Northern Ry dans les Cascades Mountains.

L'utilisation de la faible fréquence de 15 à 16 périodes est justifiée de son côté par les raisons suivantes :

1^o Elle donne avec un petit nombre de pôles une vitesse faible du moteur, telle qu'il soit possible de commander directement, par manivelle et bielle, les roues motrices de la locomotive, sans l'interposition d'engrenages : les ingénieurs italiens semblent avoir attaché une grande importance à cette élimination des engrenages,

D'autre part, pour obtenir un couple maximum convenable, il faut que le coefficient de dispersion qui représente l'importance des fuites magnétiques entre les deux enroulements ($\sigma = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2}$, avec L_1 , L_2 inductances du primaire et du secondaire, M , inductance mutuelle) reste suffisamment faible (entre 0,05 et 0,10); ce coefficient augmente rapidement avec l'entrefer et le nombre de pôles; par suite, puisque l'entrefer est grand, le nombre de pôles doit être petit, et une vitesse faible ne peut être réalisée que par l'emploi d'une basse fréquence.

2^o Elle permet de réaliser des moteurs d'induction possédant à la fois un entrefer relativement grand, nécessaire mécaniquement, pour les moteurs de traction et un facteur de puissance convenable. Le nombre des ampère-tours magnétisants doit être beaucoup plus grand dans un moteur de traction à fort entrefer que dans les moteurs ordinaires, et il en résulte que ce moteur, à fréquence normale, aurait forcément un facteur de puissance assez faible. Mais à faible fréquence, le facteur de puissance devient meilleur, car il a pour valeur le rapport :

$$\frac{\text{puissance utile}}{\sqrt{\text{puissance utile}^2 + \text{puissance magnétisante}^2}}$$

et la puissance magnétisante est, pour une même induction dans le moteur, ou ce qui revient au même pour un nombre égal d'ampère-tours magnétisants, proportionnelle à la fréquence; de telle sorte que le facteur de puissance est le même pour un moteur normal à 50 périodes et pour un moteur de 16,66 périodes, fonctionnant à la même induction et comportant trois fois plus d'ampère-tours.

3^o La chute de tension, due à l'inductance considérable de la ligne de traction, augmente proportionnellement à la fréquence, et devient très gênante aux fréquences de l'ordre de 40 à 50 périodes.

Chemins de fer triphasés italiens.

Les premières applications de la traction électrique en Italie, en laissant de côté des essais de traction à accumulateurs, ont été faites en 1900, à la fois en triphasé à 3000 volts sur les lignes de Valteline, appartenant au réseau de l'Adriatique et en courant continu 600 volts, avec troisième rail, sur les lignes Varesines (Milan-Gallarate-Varèse et Porto Ceresio), appartenant au réseau de la Méditerranée.

On s'était proposé surtout, dans ces deux applications, à des lignes de faible trafic, de réaliser une exploitation, à la fois plus économique que la traction à vapeur, par suite de l'emploi de l'énergie hydraulique, et plus agréable pour le public, par la multiplication du nombre des trains.

Plus tard, lorsque les chemins de fer eurent été repris par l'Etat, fut entreprise l'électrification de la ligne de Giovi Vecchia, dans un but tout différent, savoir l'augmentation de la capacité de transport de cette ligne dont la pente maximum atteignait 35 pour 1000, et la suppression des ennuis et accidents dus à la fumée dans les tunnels; le système à courant continu de Milan Gallarate fut laissé de côté, et l'installation exécutée en triphasé (3300 volts et 16 périodes) comme à la Valteline.

Faute d'énergie hydraulique disponible, on construisit, à la Chiappella, une centrale à vapeur, qui sert maintenant de réserve. Le résultat technique fut excellent et l'électrification étendue à un certain nombre d'autres lignes, dans le même système.

Finalement, les voies ferrées italiennes, à traction triphasée, comprennent (*fig. 1*, extraite de la R. G. E., 28-4-17) :

1° *Les lignes de la Valteline*, Lecco-Colico-Sondrio et Sondrio-Chiavenna, longueur 105,6 km; avec nombreux tunnels, courbes fréquentes descendant à 300 m de rayon, et pentes maxima de 20 mm, exploitées électriquement depuis 1902; trafic annuel 1906-1907; 67,5 MTKm (millions de tonnes-kilomètres) remorquées devenu en 1913-1914, 97,8 MTKm.

2° *L'ancienne ligne des Giovi* (Giovi Vecchia), à double voie, Sampierdarena-Campasso-Ponte Decimo-Busalla-Ronco, longueur 28,3 km; avec pentes atteignant 35 mm, et une moyenne de 27 mm sur le tronçon de Ponte Decimo à Busalla (10,4 km), nombreux tunnels et courbes de 400 m de rayon, trafic annuel 1913-1914,

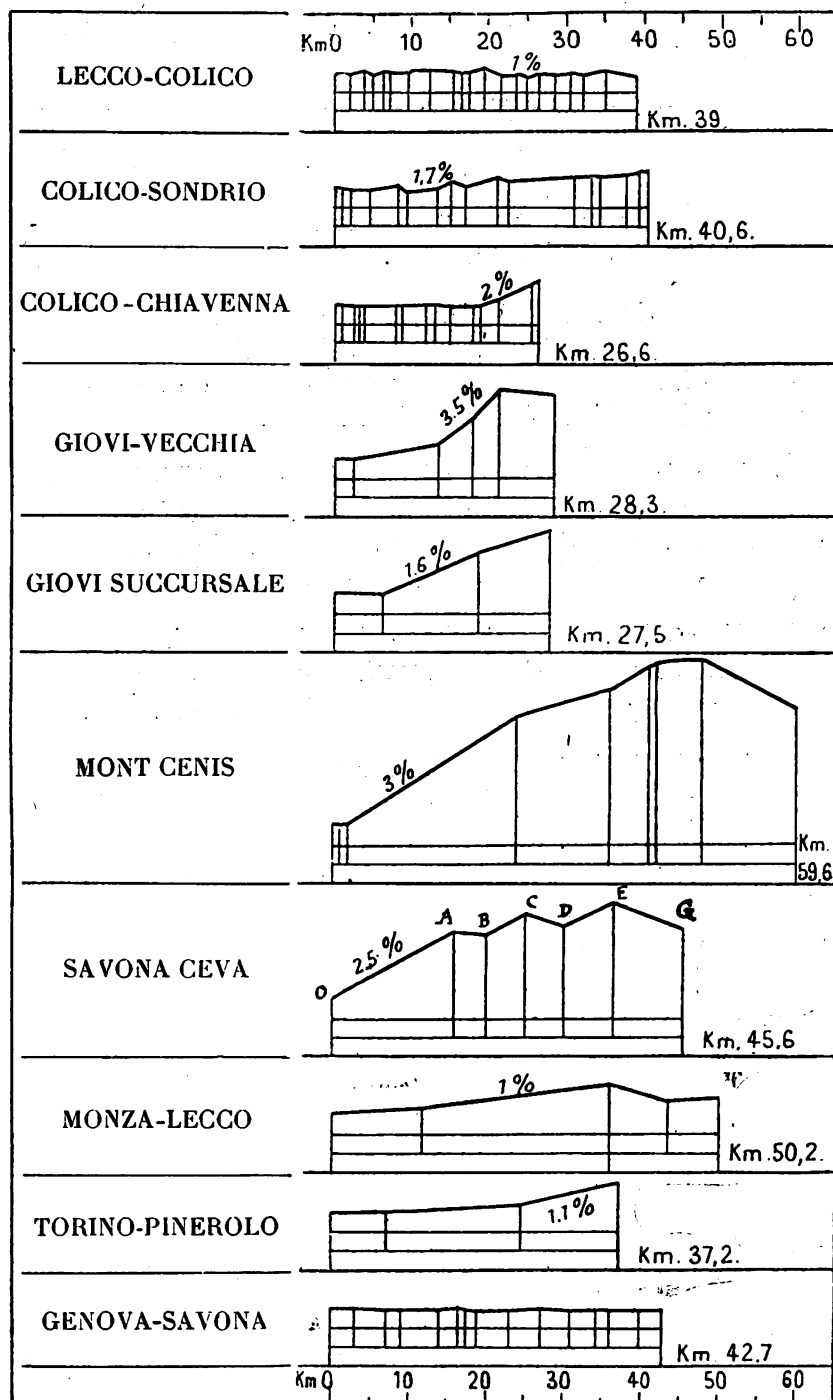


Fig. 1. — Profil des lignes triphasées italiennes. — Janvier 1917.

115 MTKm, actuellement, voisin de 150 MTKm; exploitées électriquement depuis 1911.

3^o *La nouvelle ligne des Giovi* (Giovi succursale) Gênes-Sampierdarena-Ronco, à double voie; longueur 27,5 km; en pente plus douce que la précédente, maximum 16 mm, avec nombreux ponts, viaducs, tunnels, assurant un trafic formidable de 300 MTKm, mise en service ces dernières années.

4^o *La ligne du Mont-Cenis*, Busselengo-Bardonecchia-Modane (1912-1915) longueur 59,3 km, pente maximum 30 mm; voie unique de Bussolengo à Salbertrand (23,6 km) et double de Salbertrand à Modane (35,7 km). Trafic actuel, 150 MTKm.

5^o *La ligne de Savona à Ceva* (1914) longueur 45,3 km en montagnes russes, pente maximum 25 mm, entièrement à voie unique, avec un trafic actuel de 180 MTKm; 1,62 million de tonnes de marchandises ont été importées à Savone en 1913.

6^o *La ligne de Monza à Lecco* (1914-1915), à double voie sur 7 km entre Lecco et Calolzio, et à simple voie sur le reste du trajet, longueur 37,3 km, avec pente maximum de 12 mm.

7^o *La ligne de Turin à Pignerol*, avec pente maximum de 11 mm, et longueur 37,2 km, dont 7,5 km à double voie.

8^o *La ligne de Sampierdarena à Savone*, ligne plate de 39,7 km, de longueur, à simple voie.

Au total, cet ensemble a une longueur réelle de 390 km de route et 650 km de voie simple.]

LIGNES DE CONTACT.

Les lignes de contact sont du type à suspension transversale, et non caténaire (1). L'isolement est quadruple entre deux phases et triple entre phase et sol.

Les isolateurs doubles ont été modifiés plusieurs fois et malgré tous les perfectionnements qui y ont été apportés, ils constituent

(1) Il a été fait des essais de lignes à suspension caténaire longitudinale et il subsiste encore quelques tronçons en service aux environs de Lecco; mais ce mode de construction n'a pas été développé.

encore un point faible de la ligne : ils nécessitent une surveillance active et se brisent assez fréquemment.

Les poteaux ont été d'abord écartés de 33 m en ligne courante; mais les nombreuses coupures de circuit, résultant de la flèche de la ligne, surtout en été, ont conduit à les rapprocher à des distances de 20 m à 25 m avec tension de 400 kg pour les fils de 105 mm² et flèche maximum de 100 mm à 20° centigrades. Ces poteaux sont presque toujours en tubes du genre Mannesmann.

Chaque ligne de contact est, en général, constituée de deux fils de cuivre dur, de 11 mm de diamètre environ, placés l'un près de l'autre, formant ainsi une section de 210 mm².

A chaque station, l'alimentation est faite au moyen de feeders bipolaires, au nombre minimum de 5; les lignes sont coupées par des isolateurs de section (fig. 2) de façon à former cinq circuits indépendants :

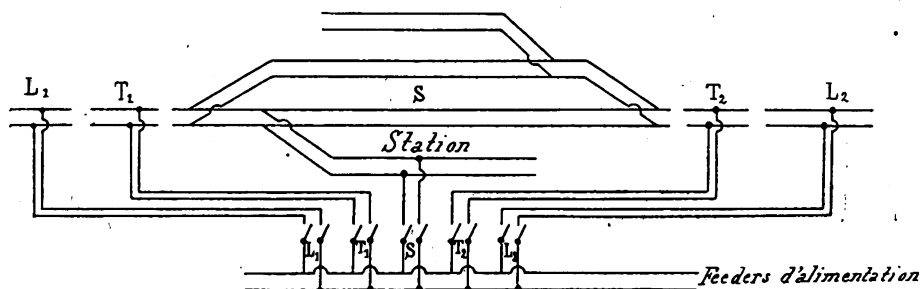


Fig. 2. — Schéma d'alimentation d'une station en traction triphasée.

L₁ et L₂ sont les lignes courantes amont et aval, T₁ et T₂ deux lignes tampon amont et aval, et S l'ensemble des lignes de la station, ces circuits étant commandés par cinq interrupteurs différents.

Les lignes tampon T, d'environ 50 m de longueur, ont pour but d'empêcher que le courant ne passe de L₁ à S ou de L₂ à S ou inversement, par l'intermédiaire de la double paire d'archets que possèdent tous les locomoteurs.

Les dispositions sont prises, par des enclenchements convenables, pour que les lignes tampon soient toujours isolées dès que la station ou la ligne courante correspondante sont, l'une ou l'autre, en dehors du circuit. Les interrupteurs peuvent aussi être enclenchés avec les sémaphores, suivant diverses combinaisons.

Les rails servant de conducteurs pour la troisième phase, sont reliés électriquement de diverses façons : sur la ligne de Savona-Céva, on a employé des connecteurs en fer doux, pour éviter les vols souvent commis sur les connexions en cuivre.

Les lignes sont alimentées par des sous-stations statiques, au nombre de 3 pour la Valteline, 6 pour la ligne du Mont-Cenis, 5 pour la ligne de Savone à Céva, 4 pour la ligne de Giovi Vecchia, et 4 pour Monza à Lecco.

A Sampierdarena, près de Gênes, existe un grand poste de commutation qui reçoit de l'énergie à 16,67 périodes :

1° A 70 000 volts, des centrales de la Société Negri, hydro-électrique à San-Dalmazzo et thermique à Savone (15 000 kw).

2° A 60 000 volts, de la centrale hydro-électrique d'Acceglio de la Société Maira.

3° A 15 000 volts, de la centrale thermique de Gênes de la Société Maira.

Ce poste distribue le courant à 15 000 volts à l'ancienne ligne et à 27 500 volts à la nouvelle ligne des Giovi; il possède environ 20 000 kw de transformateurs.

LOCOMOTEURS.

Au début de l'exploitation de la Valteline, pour les trains de voyageurs, on a utilisé des automotrices à deux vitesses de la maison Ganz de Budapest; elles avaient 2 bogies, de chacun 2 essieux, pesaient 56 tonnes et possédaient 4 moteurs : 2 à haute tension, 2 à basse tension qui attaquaient chacun un essieu, par engrenage cylindrique comme dans les tramways. A la grande vitesse, 66 km : h à la fréquence 15, les deux moteurs à haute tension, un par bogie à l'intérieur, étaient seuls en fonctionnement; en petite vitesse, 33 km : h, chaque moteur à haute tension était couplé en tandem avec le moteur à basse tension du même bogie. Le démarrage se faisait sur résistances liquides intercalées dans le rotor correspondant.

Pour les trains de marchandises, on a utilisé successivement divers locomoteurs dont nous donnerons rapidement les principales caractéristiques, pour montrer les diverses solutions données successivement au problème de l'obtention de plusieurs vitesses.

Le locomoteur 0.34 (1902) n'avait qu'une seule vitesse, 33 km : h; du type B + B, il comportait 4 essieux répartis en 2 bogies, attaqués chacun avec engrenage par un moteur de 150 chevaux, à haute tension. Le démarrage se faisait par rhéostats liquides distincts, un pour chaque rotor. Le poids entièrement adhérent était 48,2 tonnes, soit pour une puissance unihoraire de 600 chevaux, 80 kg par cheval.

Le locomoteur 0.36, ou E-360 (1904), du type 1-C-1 à deux vitesses 33 et 66 km : h, était tout différent du premier.

Les trois essieux couplés étaient attaqués au moyen d'une bielle triangulaire à glissière verticale et de deux bielles horizontales (comme le furent plus tard les locomoteurs F_{3/5} du Simplon et tous les locomoteurs Westinghouse, à 2 et à 4 vitesses), par deux moteurs fixés sur le châssis. Chaque moteur était en réalité constitué de deux moteurs accouplés, l'un à haute tension et l'autre à basse tension, les deux rotors étant fixés sur le même arbre et reliés en connexion électrique permanente. A la petite vitesse, les deux moteurs de chaque groupe étaient montés en cascade; à la grande vitesse les rotors étaient mis en court circuit et le moteur à basse tension inutilisé.

Dans le locomoteur 0.38 (1906-1907), construit sur les données du Service des chemins de fer, la partie mécanique était semblable, mais les deux groupes de moteurs furent remplacés chacun par un moteur unique à haute tension, l'un à 8 pôles et l'autre à 12 pôles, qui devaient donner, par emploi séparé, des vitesses respectives de 63 et 42 km : h, et par groupement en cascade, 25 km : h; mais le dispositif a été abandonné, la marche avec un seul moteur étant incompatible avec la commande par bielle triangulaire et les locomoteurs furent ultérieurement transformés en machine à deux vitesses 42 et 21 km : h par groupement en cascade et en parallèle.

Vers ce moment (1906) se place la mise en service de la ligne triphasée du Simplon (en Suisse), pour laquelle furent exécutés trois types successifs de locomoteurs, par la maison Brown-Boveri :

Deux locomoteurs F_{3/5} ou 1-C-1, mécaniquement analogues aux locomoteurs 0-36, mais ayant une puissance unihoraire de 1100 chevaux et un poids de 62 tonnes (56,3 kg par cheval), et deux vitesses, 70 et 35 km : h obtenues par l'emploi d'un commutateur de pôles, donnant 8 ou 16 pôles, avec rotor à 6 phases; cette combinaison était plus légère que celle des moteurs doubles de la Valteline.

Deux locomoteurs F_{4/4} ou type D, à adhérence totale (1907-1908), pesant 68 tonnes pour une puissance unihoraire de 1700 chevaux, soit 40 kg par cheval.

Ils comportent quatre essieux couplés, actionnés par deux moteurs placés au centre de la machine; chaque moteur attaque la paire d'essieux opposée par deux bielles obliques articulées, et les deux moteurs sont reliés par une bielle horizontale. Les essieux intérieurs, écartés de 4,60 m, tournent dans des paliers rigidement fixés au châssis; les essieux extérieurs sont du type Klein-Lindner

permettant un jeu à la fois axial et latéral : la bielle agit sur une manivelle dont le palier est fixé au châssis, et les roues sont portées par un arbre creux extérieur relié par un entraîneur à l'arbre de la manivelle, avec interposition de divers ressorts. Le diamètre des roues a été ramené à 1,25 m pour faciliter le roulement dans les courbes.

Les vitesses de régime sont au nombre de quatre : 70, 52, 35 et 26 km : h ; les moteurs portent sur le stator deux bobinages indépendants, établis pour 6 et 8 pôles respectivement, pouvant chacun se transformer en bobinage à nombre double de pôles, par le même artifice que dans le locomoteur $F_6 3/5$. La présence de deux bobinages à 6 et 8 pôles, a conduit à adopter au rotor un enroulement en cage d'écureuil susceptible de fonctionner avec n'importe quel nombre de pôles. Le démarrage se fait alors par variation de la tension appliquée au stator, au moyen d'un autotransformateur à diverses prises de tension : ce dispositif n'a été reproduit dans aucun autre locomoteur triphasé.

Le dernier locomoteur mis en service vers 1912, au Simplon, du type $F_6 4/6$, ou 1-D-1, est plus puissant que les précédents et comporte (fig. 3) quatre essieux moteurs chargés à 17 tonnes et deux

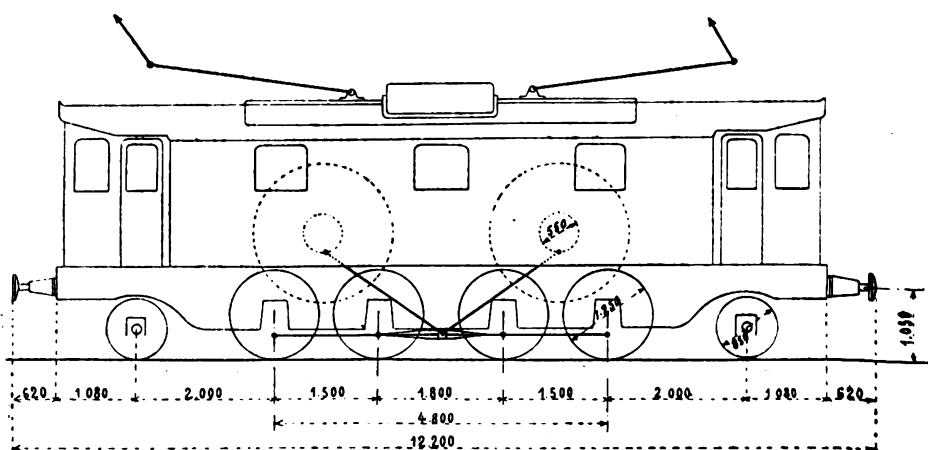


Fig. 3. — Locomotive triphasée du Simplon FE 4/6.

essieux porteurs chargés à 9 tonnes. Il pèse au total 84 tonnes, dont 68 tonnes adhérentes et ses deux moteurs développent, en tout, une puissance unihoraire de 1050 chevaux à la vitesse de 26 km : h et 2800 chevaux à 71 km : h avec un effort à la jante des roues égal à 13 tonnes pour toutes les vitesses.

Les deux moteurs très surélevés attaquent par bielles obliques

opposées une bielle horizontale médiane, avec palier mobile dans des glissières verticales pour permettre le jeu des ressorts de suspension, disposition qui évite l'emploi d'un faux essieu ou arbre auxiliaire.

Les essieux moteurs extrêmes forment bogie avec les essieux porteurs correspondants.

Les deux moteurs permettent la réalisation d'une gamme de quatre vitesses, égale à celles du locomoteur F, 4/4, mais par des procédés différents. On a maintenu l'utilisation de deux nombres de pôles, 6 et 8, mais on est revenu au rotor bobiné, avec démarrage par résistances et l'on a remplacé le doublement du nombre des pôles par l'utilisation du groupement en cascade.

Il n'y a plus sur le stator qu'un seul enroulement, avec groupement de bobines modifié par un combinateur, et l'accouplement en tandem se fait rotor sur rotor : il y a 36 sorties sur chaque stator et 7 sorties sur chaque rotor.

La disposition mécanique originale de ce locomoteur a donné naissance à des échauffements de paliers de moteurs ; il n'a pas été possible de savoir si cet inconvénient pouvait être surmonté, le locomoteur ayant été retiré du service parce qu'il était beaucoup trop puissant pour les deux petites usines génératrices du Simplon.

Après cette digression sur les locomoteurs du Simplon, nous revenons aux chemins de fer italiens, pour étudier les locomoteurs nouveaux, mis en service d'abord aux Giovi, en 1908.

Locomoteur E-550 à deux vitesses, type des Giovi. — Ce locomoteur, de la série 0,50 ou E-550, de la Société Westinghouse italienne, est à 5 essieux moteurs couplés, sans essieux porteurs, avec deux vitesses : 50 et 25 km : h ; il pèse 60 tonnes et développe 2000 chevaux unihoraires (à la jante des roues), ce qui donne un poids remarquablement faible de 30 kg par cheval unihoraire. 150 locomoteurs de ce type sont en fonctionnement sur toutes les lignes.

Les caractéristiques de ce locomoteur sont les suivantes (*fig. 4*) :

Deux moteurs de 1000 chevaux de puissance unihoraire, placés près du centre de la caisse, attaquent par une bielle triangulaire évidée à glissière verticale, dont le détail est représenté dans la figure 5, un essieu central, avec bouton manivelle mobile dans une glissière verticale sans jeu latéral ; les deux autres essieux de chaque côté sont commandés par des bielles horizontales d'accouplement.

Pour permettre la circulation en courbe, les essieux n^{os} 2 et 4 sont seuls sans jeu latéral ; les autres essieux admettent un jeu

latéral de plus de 25 mm et les roues de l'essieu central ne comportent pas de boudin. Les coussinets 1 et 2 des boutons de manivelle

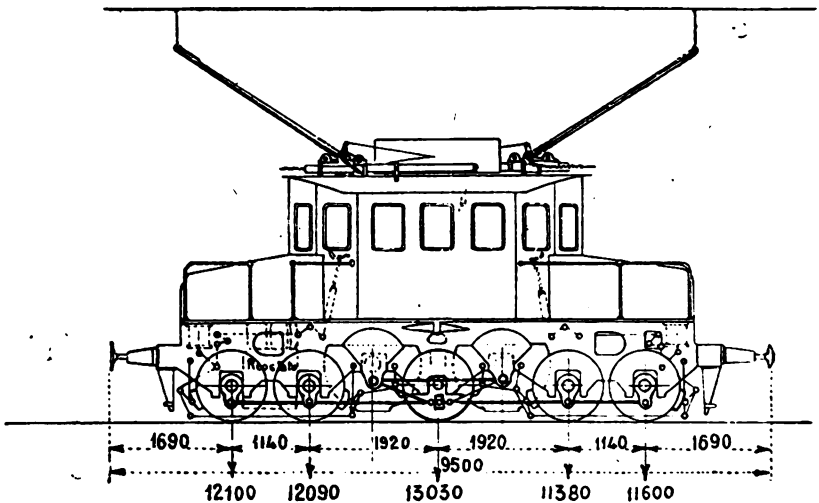


Fig. 4. — Locomoteur E-550 (type de Giovi).

des [moteurs 3 et 4 des bielles d'accouplement, sont munis de paliers sphériques à rotule.

Les moteurs ont double palier de chaque côté, le palier intérieur servant à assurer le centrage du rotor et le palier extérieur à sup-

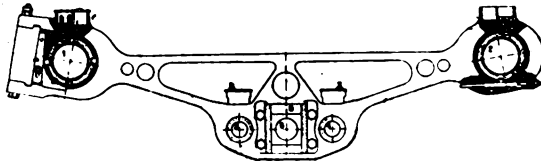


Fig. 5. — Bielle triangulaire (locomoteur E-550) : 1-2, coussinets des boutons de manivelle des moteurs avec paliers à rotule; 3-4, filetage avec paliers à rotule pour les bielles d'accouplement; 5, coussinet de bouton de manivelle de la roue médiane; 6, logement rectangulaire.

porter le poids de ce rotor et les réactions des manivelles, ce qui a permis de limiter à 2 mm l'entrefer du moteur. Le stator est fixé à un cadre horizontal reposant sur les paliers extérieurs par des ressorts : le remplacement d'un moteur avarié ne demande que deux heures, y compris démontage et remontage des bielles.

Les deux vitesses de marche normale s'obtiennent par couplage en cascade pour la faible vitesse (25 km : h) et en parallèle pour la grande vitesse (50 km : h).

Le rhéostat liquide servant au démarrage (*fig. 6*) est composé de deux chambres, l'une inférieure contenant le liquide, et l'autre supérieure, les électrodes isolées de la masse. Pour démarrer, on fait

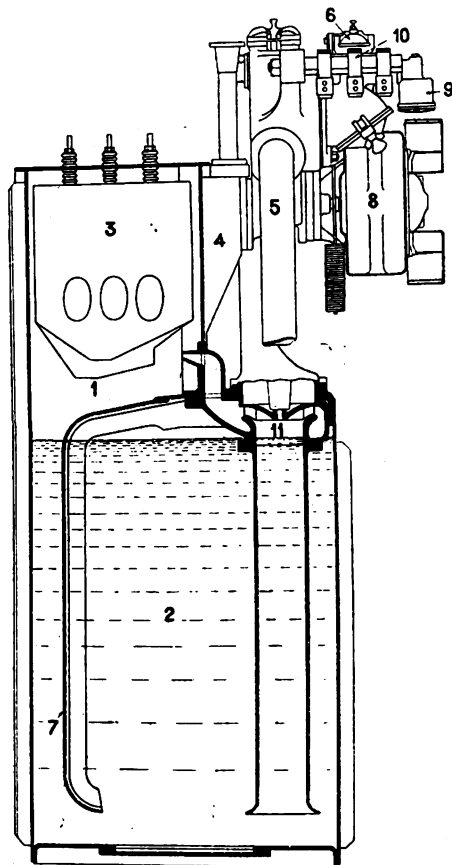


Fig. 6. — Schéma du rhéostat liquide : 1, chambre n° 1 ; 2, chambre n° 2 ; 3, paquet de tôles ; 4, chambre du flotteur ; 5, tubulure d'arrivée d'air comprimé à la chambre n° 2 ; 6, levier de commande de la soupape d'admission et d'échappement de l'air comprimé ; 7, tôle de séparation des chambres n° 1 et 2 ; 8, wattmètre régulateur ; 9, relais ; 10, balais de court circuit ; 11, pompe centrifuge de circulation.

monter, par introduction d'air comprimé dans la chambre inférieure, le liquide progressivement dans la chambre supérieure, ce qui diminue peu à peu la résistance jusqu'à ce qu'elle soit finalement mise d'autre part en court circuit par l'action d'un flotteur sur un interrupteur spécial. La manœuvre du rhéostat liquide est commandée par la manette principale du contrôleur, mais elle est en même temps soumise à deux relais agissant sur les soupapes d'ad-

mission et d'échappement d'air comprimé. Ces relais étaient réglés, dans les premiers locomoteurs, de façon à maintenir l'intensité constante dans le circuit primaire (phase reliée au rail); les relais ampèremétriques ont été maintenant remplacés par des relais watt-métriques établis pour maintenir la puissance constante, quelle que soit la tension d'alimentation, qui varie de 2700 à 3700 volts.

Tous ces locomoteurs triphasés sont munis de deux freins à air comprimé Westinghouse, un frein automatique ordinaire et un frein direct ou modérable.

La puissance unihoraire correspond à 320 ampères par phase, l'effort développé aux jantes étant alors d'environ 11650 kg, après déduction de 5 pour 100 pour les pertes par frottement dans le locomoteur.

Locomoteurs à grande vitesse. — Dans ces dernières années, les chemins de fer italiens ont commandé aux maisons italiennes Westinghouse et Brown-Boveri et à la Société suisse des Ateliers Cérlikon, des locomoteurs nouveaux, à 4 vitesses, 100, 75, 50 et 37,5 km : h, la vitesse normale étant 75 km : h.

Ces locomoteurs doivent développer, sous 3700 volts et 16,67 périodes par seconde, à la périphérie des roues, un effort de 9 tonnes aux deux vitesses inférieures, de 9,5 tonnes à la vitesse normale de 75 km : h et de 6 tonnes à la grande vitesse, avec rendement des moteurs à la vitesse normale, 93,5 pour 100 et facteur de puissance 85 pour 100. Ils doivent également pouvoir fonctionner en traction multiple, avec les locomoteurs de la série 0.50.

Les autres conditions imposées sont : poids maximum, 73 tonnes : poids adhérent, 45 tonnes, pouvant s'élever à 51 tonnes par déchargement des essieux porteurs; effort maximum au démarrage (à la jante des roues) 0,25 du poids adhérent, soit 11,5 à 12,7 tonnes.

Comme conséquence, de pareils locomoteurs pourront remorquer des trains de voyageurs de 350 tonnes à 75 km : h, sur rampe de 16 mm, en courbe de 500 m.

Ils sont destinés à la traction des trains de voyageurs (éventuellement de marchandises) sur les lignes Monza-Lecco, Gênes à Savone, et Gênes à Ronco par la ligne nouvelle.

Locomoteur Westinghouse 1-C-1 à quatre vitesses du groupe E-330 (2600 chevaux). — Au point de vue mécanique (fig. 7), la commande des trois essieux couplés par les deux moteurs fixés au châssis se fait comme dans la série E-380, mais la caisse est plus grande à cause de l'augmentation de la puissance et du nombre

des vitesses, ce qui a nécessité un grand développement de l'appareillage.

Le poids total est de 73 tonnes pour 2600 chevaux, ce qui fait 28 kg par cheval unihoraire. Les trois essieux couplés ont un jeu latéral de 25 mm pour l'essieu central et de 26 mm pour les deux essieux extrêmes; il y a un essieu porteur à chaque extrémité.

La bielle triangulaire, très évidée, est remarquablement légère; sa hauteur est beaucoup plus grande que dans les locomoteurs E-350.

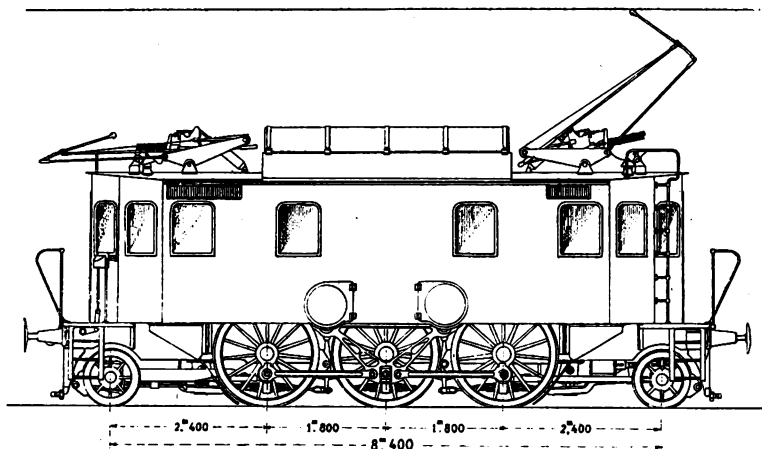


Fig. 7. — Locomoteur E-330 Westinghouse, 2600 ch^a, 4 vitesses.

La gamme des quatre vitesses est obtenue par l'emploi de deux groupements différents d'un même bobinage, donnant l'un du triphasé à 8 pôles et l'autre du diphasé à 6 pôles, au rotor comme au stator, et par le montage en parallèle ou en cascade des moteurs ainsi combinés.

Chaque rotor porte d'un côté quatre bagues pour le fonctionnement en diphasé et, de l'autre, trois bagues, pour le triphasé; lorsqu'on met en court circuit les bagues d'un des systèmes (par exemple les quatre bagues du diphasé), on obtient un rotor triphasé à bobines en parallèle dans chaque phase et à groupement en étoile, dont les quatre bagues court-circuitées sont le point neutre et les trois autres bagues, les bornes extérieures et inversement.

Ce rotor est fermé au démarrage sur un rhéostat liquide spécial, à 24 électrodes disposées d'un côté en trois groupes de quatre reliés au triphasé et de l'autre côté, en quatre groupes de trois reliés au diphasé. Quand on se sert d'un système (diphasé ou triphasé) les électrodes de l'autre sont toutes reliées en parallèle par le court circuit des bagues correspondantes.

Les stators sont alimentés en diphasé, à 3600 volts par phase, au moyen d'un autotransformateur Scott disposé entre les fils de contact et les stators.

Le reste de l'équipement électrique est analogue à celui du locomoteur E-550; les contrôleurs commandent, par courant à basse tension, des relais électro-pneumatiques actionnant les combinateurs et inverseurs. La petite manette du contrôleur donne successivement les quatre vitesses de marche et la grande manette agit sur le rhéostat liquide de démarrage; un régulateur à puissance constante est inséré dans cette opération, comme dans le locomoteur précédent.

Locomoteur Brown-Boveri 2-C-2, à quatre vitesses, série E-331 (2600 chevaux). — Ces locomoteurs sont destinés à répondre aux mêmes conditions que les locomoteurs Westinghouse 1-C-1 de la série E-330 que nous venons de décrire.

Au point de vue mécanique, ils en diffèrent par l'emploi de deux bogies porteurs de chacun deux essieux, à l'avant et à l'arrière (fig. 8), (au lieu de deux essieux simples), et par la commande

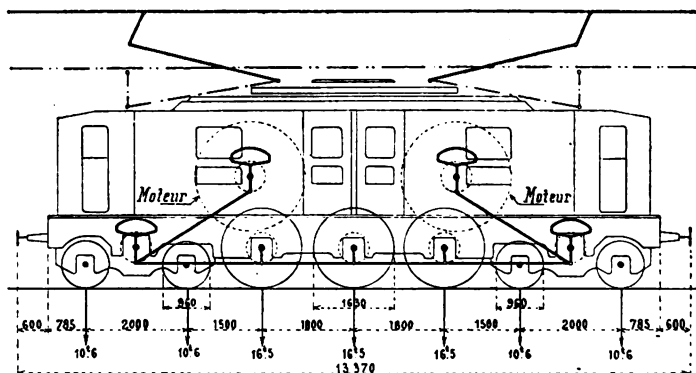


Fig. 8. — Locomoteur Brown-Boveri, 2-C-2 à 4 vitesses.

des trois essieux accouplés au moyen de bielles obliques formant un angle très aigu avec les bielles d'accouplement (33°) et attaquant un faux essieu situé au milieu du bogie; les essieux accouplés n'ont pas de jeu latéral (longueur rigide 3,60 m), les bogies ont un jeu de 50 mm, un empattement de 2 m et des roues de 0,96 m. Les moteurs sont ainsi très rapprochés du milieu du véhicule, et le centre de gravité des masses suspendues très éloigné des réactions latérales de la voie sur le châssis. Toutes les bielles d'un côté sont dans le même plan vertical et reliées par des coussinets sphériques.

Les stators des moteurs sont rigidement fixés au bâti.

Pour un poids adhérent de 49,5 tonnes, le poids total est 84 tonnes, soit 32,3 kg par cheval unihoraire.

L'équipement électrique se rapporte au système du locomoteur F b 4/4 du Simplon. Les quatre vitesses sont obtenues, comme dans le locomoteur Westinghouse, par l'emploi de bobinages à 6 et 8 pôles, avec accouplement en parallèle ou en cascade, mais les groupements sont obtenus d'une façon différente.

Le bobinage des stators comporte 36 extrémités libres, et chaque stator possède un commutateur de pôles qui établit le groupement en 6 ou 8 pôles, l'enroulement restant triphasé dans les deux cas.

Les rotors contiennent chacun un commutateur analogue, mobile avec eux. L'accouplement en cascade se fait par les rotors et le stator du moteur secondaire porte un commutateur spécial pour grouper son enroulement en étoile ou en triangle, dans le fonctionnement en cascade. (On évite ainsi l'obligation de se servir de diphasé, comme dans le locomoteur Westinghouse, mais les rotors et les combinateurs de stator sont beaucoup plus compliqués que dans l'autre machine.)

Le rhéostat de démarrage est métallique et les résistances sont placées à la partie supérieure de la voiture.

Locomoteurs Ārlikon 2-C-2, à quatre vitesses, série E-332 (2600 chevaux). — Ils ne diffèrent des précédents (*fig. 8*) que par quelques détails de l'équipement électrique, spécialement dans la nature du contrôleur principal.

Remarque sur le fonctionnement des locomoteurs de l'État italien. — Le locomoteur Westinghouse, à quatre vitesses, a donné de bons résultats, il s'est montré très robuste, de même que le type E-550. La bielle triangulaire, bien que très légère et travaillant sous un angle beaucoup plus grand que celle du locomoteur E-550, résiste également fort bien aux à-coups de toute sorte.

Le seul défaut de cette machine est qu'à la vitesse de 50 km : h (montage diphasé en cascade) elle donne naissance à des oscillations assez gênantes dans la tension et le courant d'alimentation.

En pratique, ces locomoteurs font surtout le service sur les lignes de Monza-Lecco et Gênes-Savone, pour les trains de voyageurs marchant à 75 km : h, et les mécaniciens passent couramment de la vitesse 37,5 à la vitesse 75, sans utiliser le cran correspondant à la vitesse 50 km : h. Ils se comportent très bien à la grande vitesse

(100 km : h) qui d'ailleurs est rarement employée, en ce moment, à cause de l'état des voies.

Les locomoteurs 2-C-2 Brown-Boveri et *Ærlikon*, ne présentent pas l'inconvénient, signalé dans le locomoteur 1-C-1 Westinghouse, d'oscillations de courant à une quelconque des vitesses; par contre, les dispositions adoptées pour obtenir les quatre vitesses entraînent une diminution de l'effort de traction aux faibles vitesses et le démarrage nécessite une intensité de courant plus grande que dans les machines Westinghouse.

De plus, la commande du rhéostat métallique est plus pénible pour le mécanicien que celle du rhéostat liquide Westinghouse et enfin le mode d'attaque des essieux moteurs par bielles obliques et faux essieux, comparé à l'emploi de la bielle triangulaire, donne naissance à des pressions plus élevées dans les coussinets, et provoque une consommation d'huile plus grande et une usure plus rapide du métal antifriction, ce qui augmente notablement les dépenses d'entretien.

MODE D'EXPLOITATION SUR LES PRINCIPALES LIGNES.

Mode d'exploitation sur les principales lignes. — Ligne de Giovi Vecchia (voir le profil dans la figure 1). — Les charges remorquées sont 190 tonnes en simple traction et 380 tonnes en double traction (locomoteur E-550).

Sur la ligne de Giovi succursale (pente maximum 16 mm), on remorque, en double traction, des trains de 630 tonnes (locomoteurs non compris), à 50 km : h à la montée ⁽¹⁾. Les trains de voyageurs express y circulent avec locomoteurs à quatre vitesses, à la vitesse de 75 km : h.

Par les deux lignes réunies, il a été monté à Ronco, en 1916, époque du trafic maximum, 1800 voitures par jour soit, à raison de 25 tonnes par voiture, un trafic à la montée de 45 000 tonnes.

Au temps de l'exploitation à vapeur, on ne pouvait dépasser 1400 voitures, et à l'heure actuelle, le trafic qui est un peu moindre qu'en 1916, est de 1600 voitures, soit 40 000 tonnes montées par jour.

Le service électrique est interrompu tous les jours de 12 h à 17 h

⁽¹⁾ Les vitesses indiquées sont tantôt 45 km : h (généralement dans les relations anciennes) et 50 km : h, dans les documents nouveaux : cela tient à ce que la fréquence adoptée a été d'abord 15 périodes et qu'elle est maintenant 16 à 17 périodes; elle est d'ailleurs différente encore dans les usines de production.

sur la ligne Succursale, pour l'entretien; l'interruption a lieu pendant la nuit sur la ligne de Giovi Vecchia.

Ligne de Savone à Ceva (voir le profil en dents de scie, fig. 1). — La double traction symétrique (un locomoteur en tête et un en queue) est admise, à la vitesse de 50 km : h, sur toute la ligne, dans les deux sens, sauf pour les trains allant vers Savone dans le tronçon San Giuseppe-Savone qui comporte une descente continue de 16,5 km, entre Ferrania et Savone, avec pente de 25 mm.

La charge remorquée admise dans ces conditions est de 460 tonnes de Savone à Pont Bormida et de 500 tonnes de Pont Bormida à Ceva, sauf l'exception indiquée pour la descente sur Savone.

Entre San Giuseppe et Savone, la traction double en tête est seule admise, la descente s'effectuant à 25 km : h, pour les trains non munis du frein continu; charges remorquées. 860 tonnes de Ferrania à Savone, et 660 tonnes de San Giuseppe à Ferrania.

Il est aussi prévu des trains à double traction avec locomoteur en tête, la charge variant avec les pentes des tronçons. En traction simple, la charge remorquée admise est 230 tonnes de Savone à Ferrania, et 250 tonnes de Ceva au sommet du Tunnel Belbo.

Dans les trains ne comportant pas de frein continu (trains de marchandises), le nombre de véhicules freinés doit être de 2 sur 5, exceptionnellement de 1 sur 3, pour certains tronçons avec récupération d'énergie sous la vitesse 50 km : h.

Le service électrique est interrompu tous les jours de 13,15 h à 16 h, pour permettre l'entretien de la ligne.

Ligne de Gênes à Savone. — Il y a 64 trains par jour sur cette ligne à simple voie. Le service des trains de voyageurs est fait par les locomoteurs à quatre vitesses. En ce moment, il n'y a pas de trains express, et comme les stations sont très rapprochées, la période de démarrage, avec résistances dans le rotor, occupe une assez grande partie du temps de parcours, ce qui doit influencer le rendement d'une façon assez notable. La vitesse normale est 75 km : h, la grande vitesse est rarement employée.

Conduite d'un train non muni de freins continus, en traction symétrique. — Pour le démarrage en palier, après échange de signaux entre les deux locomoteurs, c'est le mécanicien de queue qui met en route le premier, sur le cran de vitesse 25 km : h, poussant ainsi le train; lorsque le machiniste de tête sent que son

locomoteur est poussé, il démarre à son tour progressivement. Arrivé à la vitesse normale, 25 km : h, le mécanicien de tête-fait le passage au cran de grande vitesse, en prévenant le mécanicien de queue par un coup de sifflet prolongé. Le mécanicien de queue observe attentivement ses appareils (ampèremètre et wattmètre), règle le démarrage pour que son locomoteur soit régulièrement chargé, et passe à la grande vitesse quand il s'aperçoit que son collègue de tête a exécuté lui-même cette manœuvre.

A l'arrêt, en palier ou en montée, c'est le mécanicien de tête qui coupe le courant sur ses moteurs, en appelant l'attention de son collègue par un coup de sifflet prolongé. Le mécanicien de queue, constatant ce qui se passe par l'observation de ses appareils (augmentation de charge), désinsère à son tour ses moteurs et participe au freinage, en même temps que les garde-freins répartis le long du train. S'il s'aperçoit que le train va s'arrêter trop vite, il remet en route pour le pousser légèrement jusqu'au point d'arrêt.

En principe, quand le courant s'abaisse à la valeur de 60 ampères, qui correspond au courant d'aimantation des moteurs à 15 périodes et 3000 volts, les mécaniciens mettent leurs moteurs hors circuit.

Au démarrage en rampe, exceptionnellement, le mécanicien de tête met en route le premier, suivi presque aussitôt du mécanicien de queue.

Chaque locomoteur comporte un petit carton de forme spéciale qui, intercalé entre les mâchoires de l'interrupteur de court circuit du rhéostat liquide, sert à empêcher sa mise en court circuit et à maintenir, par suite dans le rotor, la résistance la plus faible correspondant au niveau le plus élevé de l'électrolyte dans la cuve. Les mécaniciens se servent fréquemment de ce petit carton, pour éviter qu'une mise en court circuit intempestive ne provoque des chocs dans le train.

Dans les descentes, il est fait un fréquent usage de la récupération, aux deux vitesses de 50 km : h et 25 km : h ; les longues descentes doivent être parcourues seulement à 25 km : h, par les trains de marchandises n'ayant pas le frein continu.

Toutefois la récupération automatique du système triphasé n'est pas un moyen de freinage, à proprement parler, et pour les ralentissements et les arrêts, il est nécessaire de débrancher les moteurs et d'utiliser les freins, tant des voitures que des locomoteurs.

Pour opérer un arrêt ou un ralentissement en descente, le machiniste de tête coupe ses moteurs et freine, et le machiniste de queue,

prévenu par la diminution de la puissance récupérée, coupe à son tour quand il s'aperçoit que cette puissance est devenue sensiblement nulle, puis freine autant qu'il est besoin.

Nous avons effectué un voyage, en traction symétrique, sur le locomoteur de queue, avec un train de 380 tonnes remorquées de Gênes à Ronco par la ligne de Giovi Vecchia, avec un train de 630 tonnes remorquées, par la ligne succursale, et avec un train de 460 tonnes remorquées de Savone à Ceva, et nous avons constaté que la conduite se faisait très aisément, avec un peu d'attention des mécaniciens. A un moment même, entre Savone et Ceva, le mécanicien de queue ayant aperçu de la fumée qui se dégageait d'un wagon, a provoqué l'arrêt à la première gare, en prévenant son collègue de tête par coups de sifflet et agitation d'un drapeau rouge, en même temps qu'il déchargeait ses moteurs progressivement et appelait ainsi l'attention de ce collègue.

D'autre part, l'emploi de la récupération, tout en étant appréciable, est fortement réduit par ce fait que, pour rester maître du train dans les passages délicats ou dans les endroits dans lesquels les signaux sont souvent mis à l'arrêt, ainsi que pour tenir compte de la suppression possible du courant, les serre-freins font constamment usage de leurs freins, de sorte que les moteurs ne travaillent que faiblement à retenir le train.

(Pour les mêmes raisons de sécurité, *le nombre des serre-freins reste déterminé par les mêmes règlements que pour la traction à vapeur.*)

Il n'en est pas de même dans les trains de voyageurs à frein continu, où le mécanicien, sûr d'être toujours maître de son train, ne se sert du frein que pour l'arrêt, laissant à la récupération le soin de maintenir constante la vitesse à la descente.

On a d'ailleurs observé que le parcours moyen d'un sabot de frein, qui était de 7500 km avant l'emploi de la récupération, s'est élevé en 1911-1912, avec usage de la récupération, à 23000 km, c'est-à-dire a sensiblement triplé, ce qui entraîne une diminution correspondante de l'usure des bandages et des rails.

Répartition de la charge entre les deux locomoteurs, en cas de double traction. — La puissance mise en jeu dans un moteur d'induction est fonction du glissement, et lui est même sensiblement proportionnelle. Comme le glissement normal d'un moteur, sous charge unihoraire, est d'environ 3 pour 100, c'est-à-dire que les vitesses à vide et en charge ne diffèrent que de 3 pour 100, on pouvait craindre que la moindre différence entre les caractéris-

tiques des locomoteurs d'un même train (diamètre des roues, résistance du rotor) amène des écarts de charges considérables entre les deux locomoteurs.

En fait, la pratique a montré que la répartition de charge se faisait dans de très bonnes conditions et qu'il était seulement nécessaire de prendre certaines précautions, lorsque les roues des locomoteurs présentaient des diamètres trop différents par suite de l'usure.

Le diamètre des roues motrices d'un locomoteur E-550 est 1070 mm à l'état de neuf, et on le laisse diminuer, jusqu'à 1006 mm, soit une usure de 64 mm, ou 6 pour 100.

En montée, c'est le locomoteur à roues plus grandes, dont le moteur tournant le moins vite, présente le glissement le plus important et absorbe la puissance la plus élevée; en descente, au contraire, c'est le locomoteur à roues plus petites, dont le moteur tournant le plus vite, a le glissement le plus important et fournit la puissance récupérée la plus grande. Pour égaliser les charges, il faut introduire une résistance dans le rotor du moteur à glissement plus grand, c'est-à-dire dans le locomoteur à grandes roues, à la montée et dans le locomoteur à petites roues, à la descente.

Les dispositions réglementaires adoptées sont les suivantes :

Le mécanicien est prévenu du diamètre des roues de son locomoteur et de celui de son collègue.

Pour un écart de diamètre inférieur ou égal à 5 mm, on ne prend aucune disposition spéciale, mais on se contente seulement de veiller à une bonne ventilation des moteurs les plus chargés et à une utilisation convenable des sablières pour éviter le patinage.

Pour un écart compris entre 6 mm et 15 mm, on supprime le court circuit du rhéostat (par interposition du carton isolant) dans les deux locomoteurs; le mécanicien du locomoteur à plus petit glissement conserve sa manette dans la position de résistance minimum, et celui de l'autre locomoteur règle la charge d'après le profil de la ligne et l'indication de ses appareils.

Pour un écart de diamètre, égal ou supérieur à 6 mm, le locomoteur à plus petit glissement voyage avec rotor en court circuit franc, et l'autre règle la charge au moyen de son rhéostat.

Mode de production de l'énergie. — L'énergie est fournie aux chemins de fer, presque entièrement par les sociétés particulières Dinamo, Edison, Negri et Maira, à l'exception de la centrale hydraulique d'État de Morbegno (6000 kw).

En ce qui concerne les lignes triphasées, l'énergie est produite directement à 16 périodes, et livrée à l'État dans des sous-stations qui appartiennent, en général, à ces sociétés, ainsi que la plupart des lignes primaires.

Le prix moyen de vente du courant est d'environ 4,5 centimes le kilowatt-heure.

Tout en continuant à acheter la presque totalité de l'énergie à des particuliers, l'Administration tient à avoir des centrales lui appartenant, bien que le courant ainsi produit puisse lui revenir plus cher, et cela dans le double but de pouvoir assurer l'éducation professionnelle de son personnel et discuter le prix de l'énergie avec ses fournisseurs.

Au point de vue du facteur de charge, signalons que, pour les lignes de la région de Gênes, l'énergie consommée correspond à environ 2500 heures de la puissance de pointe de 5 minutes.

Facteur de puissance moyen. — Le facteur de puissance moyen est faible : pour les lignes de la Valteline, à faible trafic, il est d'environ 0,45; il atteint 0,7 à 0,8 pour les lignes de la région de Gênes, pendant les fortes charges.

Influence sur les lignes télégraphiques et téléphoniques. — Au voisinage des voies électrifiées en triphasé, les lignes téléphoniques ont été mises sous câbles et les lignes télégraphiques locales ont été quelquefois maintenues, même avec retour par la terre, quand elles étaient parallèles sur une faible longueur. Un grand nombre de lignes ont été déplacées.

En ce qui concerne l'avenir, les chemins de fer essayent, en ce moment, de réaliser des dispositions qui permettent de ne pas écarter les lignes des voies, en particulier par l'emploi des transformateurs compensateurs. La Direction générale des Télégraphes se prête volontiers à collaborer aux recherches des chemins de fer, en vue de trouver un moyen de maintenir les lignes à courant faible auprès des voies, mais elle estime qu'il sera nécessaire d'écarter, au moins les lignes directes, alors qu'on pourra peut-être maintenir en place les lignes omnibus. La ligne télégraphique, avec télégraphe Baudot, voisine de la voie Turin-Pignerol, a dû être écartée, après des tentatives infructueuses d'installation de dispositifs de protection.

Résultats pratiques et économiques obtenus. — Nous avons déjà mentionné l'excellent fonctionnement de la traction triphasée,

ainsi que l'augmentation de capacité des lignes électrifiées, notamment des lignes des Giovi, ancienne et nouvelle, de la ligne de Savone à Ceva et de celle de Bussoleno à Modane.

En ce qui concerne l'économie réalisée sur les frais d'exploitation, par l'emploi de la traction électrique au lieu de la vapeur, les statistiques dressées par la Direction des Chemins de fer et les documents apportés dans la discussion générale intervenue en Italie au sujet de l'électrification, ont montré que cette économie était assez appréciable dans les lignes à grand trafic et à fortes déclivités des Giovi et de Savone à Ceva, sensiblement nulle sur la ligne de Bussoleno à Modane, tandis que la traction à vapeur restait, au contraire, beaucoup plus économique pour les autres lignes, à déclivités faibles ou à trafic moins important.

L'étude économique de la traction électrique en Italie présente un très grand intérêt, puisque ce pays est le seul qui possède, en Europe, une exploitation importante de grandes lignes électrifiées.

Entretien des locomoteurs triphasés. — Nous avons visité les dépôts de Lecco et de Rivarolo.

Le dépôt de Rivarolo entretient 90 locomoteurs électriques et 50 locomotives à vapeur, et possède 180 ouvriers d'un salaire moyen de 10 à 11 liras.

L'entretien des locomoteurs comprend tous les 10 jours un passage d'une journée au dépôt pour vérification des jeux dans les paliers et essai à haute tension des enroulements.

Pour les machines Westinghouse à bielles triangulaires on refait, tous les ans, les portées des arbres des moteurs (une dizaine de jours) et tous les deux ans une vérification complète, demandant 4 à 6 semaines. Dans les machines à bielles obliques, il faut refaire le travail d'ajustage de tous les paliers, au moins chaque année. Les coussinets de toutes ces machines sont ajustés sur place et réglés au dixième de millimètre, et ils doivent être revus dès que le jeu dépasse $\frac{3}{10}$. Dans les machines à bielles obliques, cette nécessité est encore plus impérieuse que dans les autres; ces machines consomment d'ailleurs environ 60 g d'huile par kilomètre, tandis que les autres ne consomment que 30 g (à 0,35 lire le kilogramme, prix d'avant-guerre), et les machines à vapeur, 40 g.

La dépense annuelle d'entretien est d'environ 6000 liras, soit 4 pour 100 du prix d'achat, pour les moteurs E-550.

Les machines Westinghouse à bielles triangulaires sont très robustes et atteignent des parcours journaliers de 300 km; certaines ont pu faire plus de trois ans de service sans être revisées.

Dans le type E-550, à bielles de forme triangulaire de faible hauteur, l'expérience a montré qu'on peut remplacer les coussinets à rotules des boutons de manivelles des moteurs par des coussinets cylindriques ordinaires, et les dépôts procèdent à cette simplification au fur et à mesure de la revision des locomoteurs.

On change tous les trois mois l'électrolyte des rhéostats, qui comprend 11 kg de soude pour 900 litres d'eau et a une densité de 1,012.

On peut admettre que 7 locomoteurs font le service de 10 locomotives à vapeur.

Projets d'électrifications nouvelles. — La Direction des Chemins de fer envisage un programme d'électrification future, portant sur environ 2000 km (longueur du réseau d'État, 14 000 km), ce qui permettra d'économiser environ 500 000 tonnes de charbon, *considération d'un grand intérêt pour l'Italie, absolument dépourvue de ce précieux combustible*, moyennant une mise de fonds de 200 millions pour les installations fixes (100 000 livres par kilomètre, non compris les centrales et le matériel roulant).

Ce programme comprend, dans une première phase d'environ cinq années, les lignes suivantes :

Ronco-Novî-Turin-Bussoleno-Suse; Ronco-Tortone (ligne nouvelle); Novi-Tortone; Florence-Bologne; Florence-Faenza; Rome-Falconara; Gênes-Spezia; Gênes-Acqui-Asti et finalement Milan-Chiasso.

Dans une seconde phase, d'également cinq années, seraient rangées les lignes :

Savone-Vintimille; Coni-Vintimille; Rome-Naples (ligne directe); Spezia-Parme; Rome-Castellammare; Naples-Foggia.

Et enfin, la troisième phase comporterait :

Gallarate-Arona-Domodossola-Iselle; Usmate-Bergame-Calolzio; Naples-Torre Annunziata-Salerno-Gragnano; Rome-Frascati.

De vives discussions ont eu lieu en Italie, au sujet de ce programme, tant au point de vue du système d'électrification à adopter que de l'avenir économique du projet.

Un grand nombre d'ingénieurs, plutôt d'ailleurs en dehors du personnel des chemins de fer que parmi ce personnel, préconisaient l'adoption du courant continu à haute tension en rempla-

cement du triphasé, mais finalement l'Administration a décidé de conserver le système triphasé. Personne, dans les deux camps, n'a proposé l'emploi du monophasé, qui semble absolument impopulaire en Italie. D'autre part, il est absolument certain que le fonctionnement technique du triphasé est excellent dans les conditions où il est utilisé en Italie.

Sans faire ici une comparaison entre les divers systèmes électriques, comparaison qui serait prématurée avant qu'on ait pu recueillir des renseignements précis sur le système à courant continu, on peut dire que l'excellent fonctionnement du triphasé semble acheté aux dépens de frais relativement élevés de première installation, et, par suite, d'exploitation, et au cours de la discussion, le reproche a été plusieurs fois fait à l'Administration d'avoir assuré uniquement un bon fonctionnement technique, sans se préoccuper du côté économique.

On a l'impression que la décision de l'Administration de continuer l'électrification en triphasé ne termine que provisoirement la lutte pour le choix du système de traction. Une ligne d'intérêt secondaire, de Turin à Lanzo, est en cours d'installation, avec traction en courant continu à haute tension; les locomoteurs de 500 chevaux sont en construction chez Brown-Boveri.

La Compagnie du Nord, compagnie privée qui exploite un réseau à voie normale au nord de Milan, sollicite en ce moment l'autorisation d'électrifier son réseau, également en courant continu à haute tension et les études sont en cours chez divers constructeurs. L'autorisation ne lui a d'ailleurs pas encore été donnée et l'affaire est en discussion en haut lieu.

Résumé des propriétés caractéristiques du triphasé. — La difficulté, redoutée de beaucoup de techniciens, d'obtenir une répartition admissible des charges entre les locomoteurs fonctionnant en traction multiple, avec des moteurs dont le glissement (écart de vitesse entre les vitesses à vide et en charge) est de 3 à 4 pour 100, a été aisément et simplement vaincue par l'usage du rhéostat liquide et de son régulateur de puissance, lorsqu'il y a une différence entre les vitesses synchrones des locomoteurs accouplés.

Le locomoteur E-550, à cinq essieux accouplés, avec deux vitesses de régime, s'est révélé un engin à la fois léger et puissant, remarquablement propre à la traction des trains de marchandises, et aucun système de traction, autre que le triphasé, n'a jusqu'ici permis la construction de locomoteurs présentant un aussi faible poids pour une puissance donnée (30 kg par cheval).

La caractéristique à vitesse constante des moteurs d'induction a fourni une vitesse moyenne fort convenable, avec une vitesse maximum de 50 km : h, pour l'exploitation des lignes de montagne à fort trafic de marchandises, en même temps que l'emploi de la récupération automatique assurait une économie notable sur les sabots de frein, les bandages des roues et les rails en même temps que sur la dépense d'énergie.

Pour les lignes de plaine, on a pu réaliser une marche convenable avec des locomoteurs à quatre vitesses, notablement plus complexes que les précédentes, mais d'un fonctionnement encore satisfaisant. Dans ce cas cependant, le triphasé semble un peu manquer de souplesse, ce qui se traduit par une plus grande difficulté de conduite pour le mécanicien et une diminution du rendement due à ce que la marche se fait très longtemps avec rhéostat, notamment dans les trains omnibus à arrêts fréquents.

L'inconvénient principal du triphasé est la complexité considérable de la double ligne de contact, ce qui entraîne une dépense d'établissement et d'entretien relativement élevée et semble faire du triphasé un système cher; mais par contre le fonctionnement de cette ligne est bon, même avec vitesses élevées.

En ce qui concerne l'alimentation en énergie, le système triphasé présente deux inconvénients très importants : le facteur de puissance global à l'usine reste très bas (de 0,4 à 0,7 suivant la puissance), malgré la faible fréquence (15 à 17 périodes), et l'emploi de cette fréquence, inutilisable pour tous autres usages, oblige soit à produire l'énergie directement à cette fréquence dans des centrales ou au moins avec des machines qui doivent alors être exclusivement réservées à la traction, soit à établir des sous-stations rotatives, pour transformer à 16 périodes, le courant généralement produit à 50 périodes dans les centrales normales, ce qui augmente notablement les dépenses de première installation et d'exploitation.

Les chemins de fer italiens ne semblent pas trop souffrir de ces deux inconvénients, à l'heure actuelle, parce qu'ils ont des centrales hydrauliques qui leur fournissent directement l'énergie à la fréquence de 16 périodes avec des groupes spéciaux, mais il est possible que, plus tard, lors de l'extension simultanée du réseau ferré électrifié et des distributions d'énergie pour tous usages à 42 ou à 50 périodes, ces inconvénients se fassent très sérieusement sentir.

Remarquons enfin que le système triphasé, comme le monophasé d'ailleurs, exerce une action perturbatrice considérable sur les

lignes voisines à courant faible et entraîne, par suite, des dépenses importantes, en vue de la mise sous câble ou de l'éloignement, au moins des plus importantes de ces lignes. (A suivre.)

M. le PRÉSIDENT. — « Je remercie M. Mauduit de sa très intéressante Communication. Les fonctions dont il a été chargé, depuis le début des hostilités, l'avaient particulièrement désigné pour nous faire l'exposé que vous venez d'applaudir.

» J'espère que cet exposé servira de préface à de nouvelles Communications sur cet important sujet.

» L'électrification des chemins de fer est une des grandes questions à l'ordre du jour et il est à désirer qu'elle soit étudiée et discutée par notre Société. »

SUR LES MACHINES A HAUTE FRÉQUENCE ET LEUR RÉGLAGE (1).

M. J. BETHENOD. — « MESSIEURS, mon intention n'est pas de présenter quelques observations au sujet de l'intéressante conférence de M. Latour; je désire seulement profiter de la circonstance pour vous faire connaître les Notes suivantes qui forment un complément technique de ma Conférence de 1914.

I. — Théorie approchée de la mise en résonance.

» Comme on le sait, les machines à haute fréquence ne peuvent donner leur charge normale que si la réactance des circuits est levée au moyen de capacités dûment réglées. Dans ces conditions, il peut être utile de se rendre compte de l'influence de cette mise en résonance sur le fonctionnement de l'alternateur même; nous diviserons, à ce point de vue, les alternateurs en trois classes :

» A. *Machines non saturées produisant directement la haute fréquence.* — Pour tenir compte de l'effet de la réaction d'induit de ces alternateurs, on a coutume, généralement, de l'assimiler à celui d'une inductance supplémentaire (Méthode de Joubert et diagramme de Behn-Eschenburg). Cette assimilation n'est légitime que si la réluctance est constante, quelle que soit la position des pôles inducteurs par rapport aux bobines induites; dans le cas général, il y a lieu d'appliquer la théorie des deux réactions de M. A. Blondel.

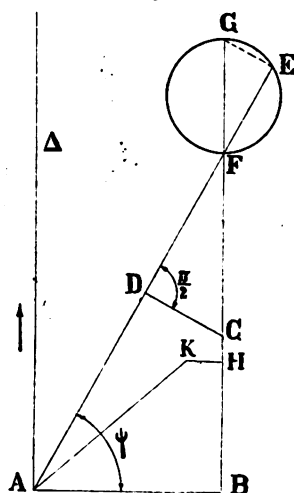
» J'ai publié jadis (voir la *Lumière électrique* du 25 décembre 1909, p. 395) un diagramme dérivé de cette théorie, et applicable directement aux alternateurs non saturés débitant sur un système comportant des capacités; je rappellerai brièvement la construction très simple à laquelle on aboutit (*fig. 1*) :

» On porte en $\overline{AB}$ une longueur mesurant la somme $R + r$ de la résistance ohmique d'utilisation et de celle de l'induit de l'alternateur; puis on prend sur la perpendiculaire élevée en B des longueurs $\overline{BC}$, égale à la somme $X + s$ des réactances *apparentes* du circuit de charge et de celle représentant l'effet des fuites (X peut naturellement être négatif, s'il y a des capacités en jeu), et $\overline{CF}$ égale à la réactance $\lambda'\omega$ représentant l'effet de la réaction trans-

(1) Faute de temps, cette Communication n'a pu être présentée en séance.

versale. Enfin, on prend FG égal à la différence $(\lambda - \lambda')\omega$ entre le coefficient de réaction directe et celui de la réaction transversale (généralement $\lambda > \lambda'$, mais la construction serait facile à étendre au cas contraire). Cela fait, sur FG comme diamètre, on

Fig. 1.



décrit un cercle, et l'on tire AF ; la longueur AE mesure le quotient $\frac{E}{I}$ de la force électromotrice à vide E par le courant correspondant aux valeurs choisies pour R et X . Supposons d'abord, en effet, que les circuits magnétiques ne soient pas saturés, et abaissons la perpendiculaire CD sur AE ; si ψ désigne l'angle BAE , on peut écrire

$$\begin{aligned}\overline{DE} &= \overline{DF} + \overline{FE} \\ &= \lambda' \omega \sin \psi + (\lambda - \lambda') \omega \sin \psi = \lambda \omega \sin \psi.\end{aligned}$$

» En multipliant donc par I toutes les lignes de la figure, on reconnaît en $ABCDEA$ le polygone de Blondel dans le cas d'une machine non saturée.

» Le diagramme de la figure 1 permet aisément de se rendre compte de l'effet produit par une variation de la réactance apparente X des appareils alimentés par l'alternateur; en effet, si X varie seul, le lieu du point A est la droite Δ parallèle à BG , et le lieu du point E est le cercle de diamètre $\overline{FG}$. On peut donc suivre pour une excitation donnée, les variations de I en fonction de X . Du diagramme, on tire d'ailleurs de suite la relation

$$\frac{E}{I} = \frac{(R + r)}{\cos \psi} + (\lambda - \lambda') \omega \sin \psi,$$

de telle sorte qu'en fonction de la variable auxiliaire ψ le maximum de I a lieu pour

$$(1) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sin \psi}{\cos^2 \psi} = -j, \\ \text{avec} \\ j = \frac{(\lambda - \lambda') \omega}{R + r}. \end{array} \right.$$

» Comme en outre

$$\tan \psi = \frac{X + s + \lambda' \omega}{R + r},$$

rien n'est plus facile de déterminer la valeur optimum pour X , en s'aidant de la courbe $y = f(\psi)$ tracée une fois pour toutes. Comme il fallait s'y attendre, quand $\lambda' = \lambda$, le maximum de (1) a lieu pour $\psi = 0$; mais, en général, l'angle ψ défini par les formules (1) sera fini et *négalif*, de telle sorte qu'en réalité, *lorsqu'un alternateur travaille à la résonance sur un circuit comportant des capacités, le déphasage interne ψ entre la force électromotrice à vide et le courant débité n'est pas nul, le courant se trouvant en avance sur la force électromotrice en question.*

» Un cas particulier intéressant est celui où le cercle coupe la droite Δ (fig. 1). Aux points d'intersection le segment AE , c'est-à-dire $\frac{E}{I}$ devient théoriquement nul; il y a alors *auto-amorçage*, le courant I pouvant être fini même si la force électromotrice E est nulle. C'est le phénomène de Rayleigh-Boucherot rappelé déjà dans notre précédente étude (*loc. cit.*). La condition d'auto-amorçage s'écrit donc

$$\frac{(\lambda - \lambda') \omega}{2} > R + r.$$

» Enfin, notons en passant que si l'on mène à la distance $BH = X$ le segment $\overline{HK}$ égal à r et parallèle à AB , et si l'on joint AK , cette longueur est la résultante géométrique de R et de X , donc mesure le quotient $\frac{U}{I}$ de la tension aux bornes de l'alternateur par le courant débité. La *surtension* existant à ces bornes, par suite de la mise en résonance, peut ainsi être évaluée facilement. D'ailleurs, le diagramme en question peut être utilisé avantageusement dans l'étude des machines à fréquence usuelle, lorsque notamment la saturation est très élevée ⁽¹⁾; nous reviendrons ultérieurement

(1) Cf. LÉAUTÉ, *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, avril 1918, p. 151 et suiv.

sur ce point dans une étude spéciale consacrée aux alternateurs et aux moteurs synchrones normaux ⁽¹⁾.

» En tout cas, ce diagramme s'applique aux alternateurs à pôles alternés faisant partie d'un couplage en cascade, ainsi qu'aux machines homopolaires à réluctance variable préconisées par M. Latour, aussi longtemps que la saturation n'atteint pas les valeurs usitées avec les machines homopolaires normales (voir la catégorie B).

» B. *Machines homopolaires à forte saturation.* — C'est surtout le cas des machines homopolaires dérivées du type classique (machines à disque, à utilisation partielle de la périphérie, etc). Comme l'a rappelé M. Latour, la force électromotrice E d'une semblable machine passe par un maximum pour une valeur donnée de l'excitation. La prédétermination de la courbe des E en fonction de l'excitation est d'ailleurs assez facile au moyen du tracé préliminaire de quelques caractéristiques partielles, et l'effacement des pôles inducteurs, lorsque les ampèretours inducteurs dépassent une certaine limite, est alors mis en évidence de la façon la plus indiscutable.

» Naturellement, avec de semblables machines, le diagramme de la figure 1 doit être remplacé par un diagramme plus complexe, inspiré des derniers travaux de M. A. Blondel, de manière à tenir compte de l'influence du débit I sur le degré de saturation du circuit magnétique.

» Toutefois, si l'on fonctionne avec un déphasage interne ψ nul (ou au moins très petit), la réaction directe en $I \sin \psi$ disparaît et la réaction transversale, qui devient égale à $\lambda' \omega I$, peut être considérée encore comme proportionnelle à I , surtout si la réluctance transversale comporte un entrefer très accusé. En d'autres termes, à la *résonance*, on peut appliquer pratiquement le diagramme de Joubert-Behn-Eschenburg, à condition de prendre comme réactance totale apparente de la machine la réactance transversale $\lambda' \omega$ [cf. mon étude précitée de 1909, p. 397, formules (3), (4), (3')]. Dans ces conditions, on peut aisément, pour le réglage particulier considéré ($X + s + \lambda' \omega = 0$), prédéterminer le débit I en fonction du courant d'excitation, en utilisant la caractéristique

(1) Si la saturation est très élevée, on peut remplacer la portion utilisée de la caractéristique à vide par une droite (ne passant pas naturellement par l'origine) et la construction reste encore valable, les coefficients λ et λ' étant modifiés en conséquence.

à vide, et en traçant le diagramme en question. D'ailleurs l'expérience paraît justifier cette manière de voir.

» C. *Machines en cascade fonctionnant en convertisseurs de fréquence*. — Dans notre Conférence de 1914, nous avons déjà développé quelques considérations au sujet du fonctionnement de ces machines. Nous allons traiter ici sommairement le cas simple de mise en résonance où l'on a affaire à un alternateur couplé avec un convertisseur de fréquence, celui-ci débitant sur une antenne. Conservant nos précédentes notations (cf. *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, juin 1914, p. 598 et suiv.), d'ailleurs évidentes ⁽¹⁾, on peut écrire symboliquement ($j = \sqrt{-1}$)

$$(2) \quad \begin{cases} E = R_1 I_1 + L_1 \Omega_1 I_1 j - \frac{1}{C_1 \Omega_1} I_1 j + M \Omega_1 I_2 j, \\ O = R_2 I_2 + L_2 \Omega_2 I_2 j - \frac{1}{C_2 \Omega_2} I_2 j + M \Omega_2 I_1 j. \end{cases}$$

» Multiplions tous les termes de la seconde égalité par le rapport $\frac{\Omega_1}{\Omega_2}$ des fréquences primaire et secondaire; le terme en I_1 , ayant alors le même facteur $M\Omega$, que celui en I^2 de la première des égalités (2), tout se passe comme si l'on avait affaire à l'ensemble constitué par un alternateur de fréquence $\frac{\Omega_1}{2\pi}$ alimentant un simple transformateur *statique* dont le circuit secondaire possède les constantes

$$R_2 \frac{\Omega_1}{\Omega_2}, \quad L_2, \quad \frac{1}{C_2} \frac{\Omega_1^2}{\Omega_2^2}, \quad M.$$

» On peut donc appliquer immédiatement les calculs et formules développées dans une précédente Note (cf. J. BETHENOD, *Sur le réglage des postes radiotélégraphiques à ondes entretenues produites par machines à haute fréquence* (*La Lumière électrique*, 2 octobre 1915, p. 3).

» En particulier, on conclut qu'au point de vue de la puissance maximum, il est encore indifférent de supprimer le condensateur primaire ($C_1 = \infty$), ou d'accorder isolément les circuits (ici $\Omega_1^2 L_1 C_1 = 1$ et $\Omega_2^2 L_2 C_2 = 1$). Toutefois, le deuxième réglage

(1) Bien entendu, les constantes R_1 , R_2 , L_1 , L_2 , etc. se réfèrent respectivement à l'ensemble des appareils compris dans chacun des circuits primaire et secondaire. Par exemple, R_1 comprend la résistance ohmique de l'alternateur de force électromotrice E , R_2 celle de l'antenne, etc.

conduit à une moindre tension aux bornes primaires du convertisseur de fréquence, et par conséquent fait travailler son fer à une induction plus faible; par contre, il est évidemment notablement plus délicat et, dans le cas de plusieurs mises en cascade successives, nécessite l'usage de bagues pour intercaler des condensateurs dans les circuits rotoriques. (Ainsi que nos collègues pourront le vérifier, la théorie qui vient d'être esquissée s'étend assez facilement au cas où l'on emploie plusieurs convertisseurs.)

II. — Régime de rendement optimum.

» Ainsi que l'a fait remarquer fort judicieusement M. Latour, le rendement global d'une machine à haute fréquence croît indéfiniment avec le courant d'excitation i aussi longtemps que la force électromotrice E augmente avec ce courant. En effet, dans une machine à haute fréquence du type homopolaire, par exemple, on se trouve en présence des pertes suivantes :

1^o Des pertes F sensiblement indépendantes de la charge : pertes mécaniques par frottement, ventilation, etc. ;

2^o Des pertes W_0 dues à la variation du flux inducteur, créant E dans les tôles constituant le noyau induit; ces pertes sont pratiquement proportionnelles à E^2 ⁽¹⁾;

3^o Des pertes ω dans les enroulements d'excitation;

4^o Des pertes dans le fer du noyau induit, correspondant au flux de réaction produit par le débit I ; ces pertes se traduisent en première approximation par une augmentation de la résistance ohmique apparente des circuits induits;

5^o Des pertes W_2 créées par le même flux dans le fer tournant du rotor; ces pertes peuvent être décomposées comme suit :

» Supposons d'abord que le rotor se présente sous la forme d'un disque ou tambour *non denté*, et faisons circuler le courant de haute fréquence I dans les enroulements statoriques. On se trouve alors en présence d'un véritable moteur monophasé d'induction avec rotor tournant au synchronisme ⁽²⁾, et les pertes par courants de

(1) Cette hypothèse, évidemment légitime pour les pertes par courant de Foucault, peut être étendue aux pertes par hystérésis, eu égard à l'incertitude relative à l'exposant à adopter pour l'induction dans la formule empirique permettant d'évaluer les pertes en question. Cf. M. LATOUR, *Remarque sur les pertes dans le fer par hystérésis* (*Revue générale de l'électricité*, 13 juillet 1918, p. 36).

(2) La cage d'écureuil fictive étant constituée par les circuits élémentaires, sièges des courants parasites.

Foucault et hystérésis dans ce rotor sont dues au flux tournant en sens inverse, flux dont la vitesse *relative* est donc double de la vitesse de rotation. Il est facile, dans ces conditions, d'entrevoir le mécanisme suivant lequel les pertes W_2 sont prélevées en partie sous forme mécanique, et en partie sous forme électrique fournie par le stator.

» En effet, d'après le principe fondamental des moteurs d'induction, ces pertes créent en premier lieu un couple résistant C défini par l'égalité

$$(3) \quad C \frac{2\Omega}{p} = W_2,$$

p étant le nombre de paires de pôles du système.

» A ce couple correspond une puissance mécanique $C \times \frac{\Omega}{p}$, c'est-à-dire moitié des pertes W_2 dans le rotor; on en conclut que l'autre moitié est fournie électriquement par le stator. Si l'on admet en outre que les pertes sont proportionnelles au carré du flux de réaction, c'est-à-dire à I^2 , cette dernière moitié s'ajoutera aux pertes définies sous 4^o) pour porter la résistance ohmique apparente des circuits induits à une certaine valeur r . Quant à la puissance mécanique prélevée sur l'arbre par le couple C , elle sera aussi de la forme ρI^2 , en fonction du débit I . Le rendement vaut ainsi

$$(4) \quad \eta = \frac{EI - rI^2}{EI + F + W_0 + w + \rho I^2}.$$

» Si donc on fait croître E , le débit I augmentera proportionnellement, et puisque W_0 varie comme E^2 , tandis que F est constant, le rendement suit bien la loi énoncée par M. Latour (w croît en fait plus vite que E^2 , eu égard à la saturation, mais se trouve pratiquement négligeable). Naturellement, le rotor est denté en réalité, et les considérations ci-dessus sur W_2 doivent être modifiées en conséquence, mais tout revient à changer la valeur des coefficients r et ρ .

» Avec une machine homopolaire, lorsqu'on atteint le maximum de force électromotrice E (voir plus haut), le raisonnement précédent ne s'applique plus, et considérant alors E comme constant, il peut être intéressant de rechercher le débit I correspondant au rendement optimum. En fonction de I , l'expression (4) est maximum pour

$$(5) \quad (F + W_0 + w) \frac{E - 2rI}{E} = (\rho + r)I^2.$$

» Cette condition est susceptible d'être traduite en langage ordinaire. En effet, $2rI$ est d'ordinaire très faible vis-à-vis de E , et l'on peut admettre que le second facteur du premier membre est sensiblement égal à l'unité; si l'on ajoute alors W_0 aux deux membres, on aboutit à la règle suivante :

« Avec un alternateur homopolaire à haute fréquence, fortement saturé et réglé à la résonance, le maximum de rendement est obtenu, en fonction du débit, quand la somme des pertes par effet Joule apparent et des pertes dans le fer en charge est sensiblement égale au double des pertes dans le fer à vide, augmenté des pertes mécaniques et des pertes dans l'enroulement d'excitation. »

» Si, dans l'expression de r , on connaît la part due à l'effet Joule réel (d'ailleurs comparativement très peu importante, en général), cette loi permet d'évaluer les pertes en charge dans le fer, par le tracé de la courbe des rendements.

III. — Régulation de la vitesse.

STABILITÉ DES RÉGIMES.

» En raison même du réglage à la résonance, il est évident que la vitesse d'un alternateur à haute fréquence doit être maintenue aussi rigoureusement constante que possible, malgré les variations de charge dues à la manipulation; d'ailleurs, même en adoptant, ainsi qu'on le verra plus loin, un dispositif pour maintenir automatiquement le réglage à la résonance en cas de légère variation de vitesse, cette variation ne passe pas inaperçue au poste récepteur, accordé lui-même sur une fréquence bien déterminée, et comportant en outre généralement une réception par battements (hétérodyne) très sensible aux variations de fréquence.

» Une solution radicale consiste à disposer sur le même arbre que la machine à haute fréquence une génératrice de même puissance et de type quelconque, à courant continu, ou monophasé, ou polyphasé (voire même un frein électromagnétique à courants de Foucault), et à mettre automatiquement en charge cette machine auxiliaire chaque fois que l'alternateur est déchargé, le couple résistant demandé au moteur demeure ainsi constant, si les circuits sur lesquels on manipule sont suffisamment amortis.

» On peut d'ailleurs se servir d'un contacteur unique pour opérer le transfert de la charge, en agissant sur les circuits d'excitation comme l'a proposé M. Latour, ou même sur les circuits principaux

comme je l'ai envisagé ultérieurement; le contacteur unique court-circuite alors l'alternateur sur lui-même en même temps qu'il ferme le circuit de charge de la machine auxiliaire, le triage des courants s'opérant facilement par des effets de résonance, de façon à éviter tout débit d'une des deux machines dans l'autre.

» Cette solution radicale offre l'inconvénient de nécessiter un matériel coûteux et assez compliqué; en outre, et surtout, la charge du moteur demeure en permanence, et par conséquent il en résulte une dépense d'énergie élevée. Il est à noter que le même défaut existe dans les installations radiotélégraphiques employant un arc type Poulsen pour la production d'ondes non amorties; pendant la manipulation, la puissance débitée par la génératrice à courant continu demeure sensiblement la même qu'en émission permanente (trait continu), les signaux étant produits par un changement de longueur d'onde ou par l'usage d'un circuit oscillant, équivalent à l'antenne, que l'on alimente par l'arc pendant les intervalles entre signaux. Au contraire, si l'on dispose d'un dispositif permettant de conserver une vitesse constante quelle que soit la charge du moteur, la puissance moyenne en manipulation demeure bien inférieure à celle exigée par une émission permanente; le rendement de l'installation est considérablement augmenté de ce fait, à égalité d'intensité des signaux.

» Un second procédé pour atteindre la constance de vitesse désirée a été utilisé dans les postes munis de machines à haute fréquence système Goldschmidt; l'alternateur est entraîné par un moteur à courant continu dont l'excitation est réglée de manière à avoir à vide la fréquence voulue; lorsqu'on veut émettre un signal, en fermant l'excitation de l'alternateur par le manipulateur (les machines Goldschmidt ont un inducteur à faible constante de temps permettant ce mode de manipulation), on insère du même coup une résistance appropriée dans le circuit d'excitation du moteur à courant continu. Ceci a pour effet de maintenir à pleine charge la vitesse qui existe à vide; lorsqu'on manipule, le courant d'excitation prend évidemment une valeur moyenne entre ses deux valeurs extrêmes, à vide et à pleine charge, et l'on peut admettre que la vitesse conserve encore sensiblement la même valeur. Bien entendu, on peut étendre cette solution approchée au cas où l'on manipule sur le courant à haute fréquence, mais l'expérience nous a paru montrer qu'elle n'est admissible qu'avec des machines de puissance modérée; sa simplicité est alors une qualité primordiale.

» Une solution plus parfaite consiste à munir le groupe d'un

régulateur de vitesse aussi sensible que possible. Dans cet ordre d'idées, le meilleur appareil est certainement celui créé jadis par Marcel Deprez (voir la *Lumière électrique* du 15 juin 1879, p. 50); primitivement, il était réservé aux faibles puissances et consistait en principe à faire agir un régulateur centrifuge sensible sur un interrupteur coupant le courant d'alimentation du moteur à courant continu, dès que la vitesse s'écartait au-dessus d'une valeur fixée, et le rétablissant dès qu'elle s'abaissait au-dessous d'une certaine valeur, d'ailleurs très voisine de la première. On obtenait ainsi une série d'oscillations imperceptibles de la vitesse entre des limites très restreintes, par un mécanisme analogue à celui des régulateurs de tension du type dit *vibrant*. La précision réalisée est telle que M. Thury a pu (voir l'*Eclairage électrique* du 16 février 1901, p. 245) réaliser une horloge-mère en combinant un semblable régulateur avec une commutatrice inversée alimentant de petits moteurs synchrones placés dans les horloges réceptrices. Notre éminent collègue a d'ailleurs appliqué le même principe aux moteurs de grande puissance, en faisant agir un régulateur aussi isochrone que possible sur un interrupteur placé aux bornes d'un rhéostat intercalé dans le circuit d'excitation de ces moteurs. A notre avis, c'est la solution idéale du problème posé.

» D'autres dispositifs ont pourtant été proposés; par exemple, Fessenden compare la vitesse du groupe à celle d'un appareil tournant à une vitesse rigoureusement constante (par exemple, roue phonique de Lacour contrôlée par un diapason entretenu), et fait agir la différence sur un organe de régulation, au moyen d'un différentiel mécanique ou dispositif analogue. Au lieu de comparer des vitesses, on peut aussi comparer la fréquence de la machine à celle d'un générateur à fréquence constante (générateur à lampes avec trois électrodes, par exemple); on peut utiliser directement le glissement ainsi observé au moyen d'un appareil à champ tournant, comme proposé par la Société Marconi, ou créer des battements agissant sur un fréquencemètre (solution préconisée par M. Billieux).

» Mais tout ceci n'offre en réalité aucun avantage sur la simple comparaison d'une tension constante et d'une tension produite par une petite génératrice couplée mécaniquement avec la machine à haute fréquence, et indépendamment de sa grande simplicité, la solution réalisée par M. Thury écarte tout danger d'oscillations de vitesse à longue période, même lorsque le degré de régulation à atteindre est extrême.

» Pour terminer cet exposé, nous signalerons le système de la

Société Lorenz (Brevet allemand 237 264 et addition). Le circuit principal à haute fréquence agit, au moyen de couplage direct ou par induction, sur deux circuits oscillants dont les périodes d'oscillation propre diffèrent très peu de la fréquence normale, l'une par excès, l'autre par défaut. En soumettant l'organe de réglage à l'action différentielle de deux électrodynamomètres placés chacun dans l'un des circuits oscillants auxiliaires, on peut évidemment maintenir la fréquence de la machine dans des limites déterminées. Mais nous ne croyons pas que ce système, d'ailleurs assez compliqué en pratique, présente quelque avantage sur le régulateur Deprez-Thury, adopté par la Société Française Radioélectrique.

» Il est intéressant de se faire une idée de l'influence des diverses constantes d'une installation avec alternateur à haute fréquence sur l'importance de la variation de débit entraînée par une variation de vitesse donnée. Nous traiterons ici le cas d'un alternateur couplé à une antenne par l'intermédiaire d'un simple transformateur, le circuit primaire ne comportant pas de condensateurs; après essais comparatifs, c'est le montage adopté normalement par la Société Française Radioélectrique. On désigne par :

E , la force électromotrice à vide de l'alternateur H , F ;

R_1 et L_1 , la résistance ohmique apparente et la réactance du circuit primaire complet (L_1 tient compte ici, en première approximation, de la réaction d'induit de l'alternateur);

R_2 et L_2 , les constantes correspondantes du circuit secondaire complet (R_2 comprend donc la résistance ohmique apparente de l'antenne);

C_2 , la capacité de l'antenne;

M , le coefficient d'induction mutuelle entre les deux circuits.

» Les formules classiques du transformateur théorique à courant alternatif montrent que tout se passe, au point de vue de l'alternateur, comme si l'on avait affaire à un circuit unique dont la résistance ohmique totale est

$$6) \quad R = R_1 + \frac{M^2 \omega^2}{R_2^2 + \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right)^2} R_2,$$

ω étant la pulsation, et dont la réactance apparente vaut

$$7) \quad X = L_1 \omega - \frac{M^2 \omega^2}{R_2^2 + \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right)^2} \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right).$$

» D'ailleurs, conformément aux considérations que j'ai développées dans une étude précitée (*Lumière Électrique* du 2 octobre 1915, p. 3), on règle les diverses constantes de manière que $X = 0$ pour la fréquence normale; comme la résistance R_2 est toujours faible, ce réglage revient pratiquement à adopter pour ω la valeur particulière Ω telle que

$$L_1 \Omega - \frac{M^2 \Omega^2}{L_2 \Omega - \frac{1}{C_2 \Omega}} = 0,$$

soit

$$(8) \quad (1 - k^2) L_2 C_2 \Omega^2 = 1,$$

en posant selon l'usage

$$k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2}.$$

» Avec l'approximation consentie, et en tenant compte de (8), la formule (6) devient

$$(9) \quad R = R_1 + \frac{L_1}{k^2 L_2} R_2.$$

» Supposons maintenant que la pulsation devienne $\Omega(1 + \varepsilon)$, ε étant très petit, et évaluons l'accroissement ΔR qui en résulte: on a évidemment, d'après la formule générale (6), en négligeant encore l'effet de la résistance R_2 sur le dénominateur :

$$(10) \quad \Delta R = R_2 \frac{k^2 L_1 L_2 \Omega^2 (1 + \varepsilon)^2}{\left[L_2 \Omega (1 + \varepsilon) - \frac{1}{C_2 \Omega (1 + \varepsilon)} \right]^2} - R_2 \frac{L_1}{k^2 L_2},$$

ou

$$(11) \quad \Delta R = - R_2 \frac{L_1}{k^2 L_2} \frac{4\varepsilon(1 - k^2)}{4\varepsilon + k^2},$$

en négligeant ε^2 dans les développements, et en utilisant la relation (8).

» D'autre part le dérèglement supposé va faire apparaître une réactance ΔX , également facile à évaluer :

$$\Delta X = L_1 \Omega \left[1 + \varepsilon - \frac{(1 + \varepsilon)^3 k^2 L_2 C_2 \Omega^2}{L_2 C_2 \Omega^2 (1 + \varepsilon)^2 - 1} \right],$$

ou sensiblement

$$(12) \quad \Delta X = L_1 \Omega \frac{2\varepsilon(1 - k^2)}{2\varepsilon + k^2}.$$

» L'impédance primaire apparente passe ainsi de la valeur

$\sqrt{R^2 + X^2}$ à la valeur

$$\sqrt{(R - \Delta R)^2 + \Delta X^2},$$

lorsque la pulsation varie entre Ω et $\Omega(1 + \varepsilon)$.

» Eu égard aux signes respectifs de ΔR et ΔX , il est donc possible d'obtenir une très faible variation du débit dans l'antenne lorsque la vitesse de l'alternateur subit de légères fluctuations. A cet égard, les formules (11) et (12) montrent qu'il y a généralement avantage à rendre le coefficient de couplage k aussi élevé que possible.

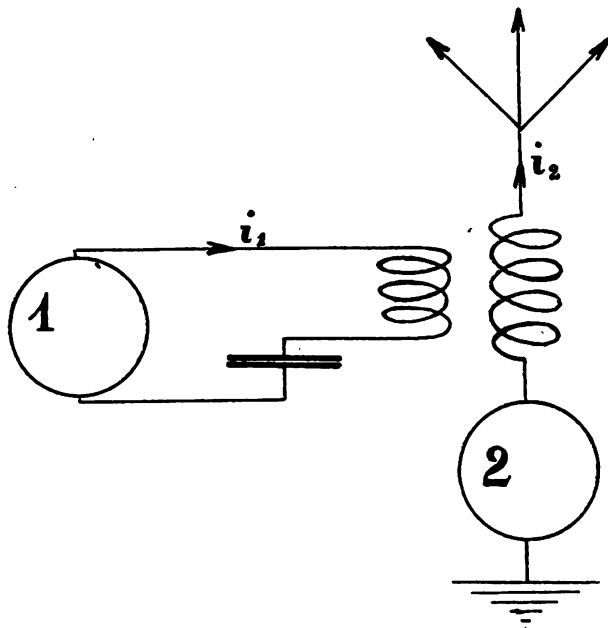
» En résumé, il est nécessaire que la courbe de résonance du système alternateur-transformateur-antenne-terre ne soit pas trop aiguë, si l'on ne veut pas que le débit dans l'antenne tombe rapidement lorsque la vitesse varie légèrement. On peut donc être tenté d'établir un dispositif maintenant automatiquement le réglage à la résonance ($X = 0$), en dépit de cette variation. Un premier essai de ce genre a été tenté vers 1890 par M. Maurice Leblanc, au moyen d'un dispositif très ingénieux, quoique un peu compliqué, agissant, d'après les légères variations de débit, sur une inductance variable; le débit est maintenu ainsi pratiquement constant, même si la fréquence n'est pas rigoureusement uniforme. En 1912, M. le colonel Ferrié nous a indiqué l'usage, dans le même but, d'un régulateur de vitesse à force centrifuge, ou dispositif équivalent, agissant encore sur une inductance variable. Récemment, M. Chireix, ingénieur de la Société Française Radio-électrique, nous a proposé un appareil très simple, basé sur l'usage d'une inductance variable dont l'organe mobile se trouve en équilibre indifférent lorsque l'intensité du courant a la valeur prévue; elle ramène automatiquement le débit à sa valeur primitive lorsque les réactions électrodynamiques l'emportent sur l'action de contrepoids ou de ressorts de rappel, ou *vice-versa*. Enfin, j'ai indiqué moi-même ultérieurement un procédé purement statique, revenant à déformer la courbe de résonance, et à en étaler le sommet, au moyen d'impédances complexes intercalées dans des circuits. On voit donc que les solutions pratiques du problème posé ne manquent pas.

IV. — Couplage des machines à haute fréquence.

» L'importance des postes radiotélégraphiques munis de machines à haute fréquence croissant sans cesse, il peut être parfois

intéressant de coupler ensemble plusieurs alternateurs et de constituer ainsi une véritable centrale pour transport d'énergie sans fil. Avec des machines en cascade la solution est simple; ainsi que l'a fait remarquer M. Latour, il suffit alors de répartir la multiplication des fréquences en plusieurs groupes électrogènes munis chacun d'un moteur indépendant et éventuellement d'un régulateur de vitesse. Avec des machines fournissant directement la fréquence requise, il ne faut guère songer à un couplage purement électrique en parallèle; il est fort probable que le couple synchronisant ne suffirait pas à assurer la rigidité voulue à un tel couplage. Un couplage mécanique demeure pourtant intéressant ici, car il permet l'emploi d'unités plus petites, donc plus faciles à réaliser, et d'autre part l'utilisation partielle de la station peut être envisagée.

Fig. 2.



» Mais même ce couplage offre quelque difficulté pratique, car le pas polaire est très réduit, et, à moins de disposer de stators décalables à volonté, la mise en phase devient très délicate. Dans ma Conférence de 1914, j'avais indiqué (Note Annexe C) le moyen de transformer deux courants diphasés en un courant monophasé unique; il est facile de généraliser le système au cas d'un déphasage électrique quelconque α . Reportons-nous en effet au schéma de la figure 2; supposons que l'alternateur 2 alimente directement

l'antenne et fournit une force électromotrice égale à vide à

$$(13) \quad e_2 = e(\cos \alpha + j \sin \alpha) \quad (j = \sqrt{-1}),$$

tandis que l'alternateur 1 est intercalé dans un circuit oscillant couplé inductivement avec l'antenne, et possède à vide une force électromotrice

$$(14) \quad e_1 = e.$$

» [Les égalités (13) et (14) indiquent que les deux alternateurs ont des forces électromotrices égales en amplitude, mais déphasées de l'angle α .]

» Désignons par :

i_1 et i_2 les courants respectifs dans les deux circuits;

z_1 et z_2 les impédances totales desdits circuits;

m leur coefficient d'induction mutuelle.

» On a

$$(15) \quad \begin{cases} e_1 = e = z_1 i_1 + m \omega i_2 j, \\ e_2 = e(\cos \alpha + j \sin \alpha) = z_2 i_2 + m \omega i_1 j. \end{cases}$$

» Pour que les deux alternateurs travaillent également et que les courants i_1 et i_2 soient respectivement en phase avec e_1 et e_2 ; on doit remplir en outre les relations

$$(16) \quad \begin{cases} i_1 = a e_1, \\ i_2 = a e_2, \end{cases}$$

le coefficient *réel* a étant à déterminer.

» En portant donc les valeurs (16) dans le système (15), on obtient les égalités simultanées

$$(17) \quad \begin{cases} 1 - a z_1 = m \omega a j (\cos \alpha + j \sin \alpha), \\ (1 - a z_2) (\cos \alpha + j \sin \alpha) = m \omega a j, \end{cases}$$

lesquelles, après élimination du coefficient a , déterminent les conditions à remplir entre z_1 , z_2 , m et α . Dans le cas particulier où $\alpha = -\frac{\pi}{2}$, les égalités (17) se réduisent d'ailleurs à

$$(17') \quad \begin{cases} 1 - a z_1 = m \omega a, \\ -1 + a z_2 = m \omega a, \end{cases}$$

ce qui donne, par élimination de a , la condition

$$(18) \quad 2 m \omega = z_2 - z_1.$$

» Le premier membre étant réel, il faut donc que les parties

imaginaires des impédances z_2 et z_1 soient égales, c'est-à-dire que les deux circuits considérés isolément soient accordés; la différence $z_2 - z_1$ se réduit alors à celle des résistances ohmiques totales desdits circuits, et l'on retrouve le résultat indiqué dans notre Conférence de 1914.

» Quoi qu'il en soit, le montage de la figure 2 permet d'atteler sur une antenne unique deux alternateurs accouplés mécaniquement, sans qu'il y ait nécessité d'avoir une concordance de phase rigoureuse entre leurs forces électromotrices, pour obtenir un fonctionnement convenable au point de vue de la répartition des charges et du facteur de puissance.

» Ce montage peut donc présenter quelque intérêt, notamment pour des stations extra-puissantes, surtout lorsque la construction adoptée pour les machines ne permet pas facilement l'usage de stators décalables (machines à disque, par exemple). Bien entendu, le principe qui vient d'être exposé s'étend au cas où l'alternateur 2 est couplé avec l'antenne au moyen d'un transformateur ou système équivalent. »

LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ

(FONDÉ PAR DÉCRET DU 24 FÉVRIER 1882).

TARIF DES ESSAIS ET ÉTALONNEMENTS (1).

A. — CONDITIONS GÉNÉRALES.

Le Laboratoire central d'Electricité se charge de l'étude des appareils électriques, des épreuves de réception de machines et de matériel et de la vérification des installations ou des marchés.

En principe tout essai donne lieu à un certificat dont l'intéressé est seul propriétaire (*voir* Règlement, 4^e paragraphe de l'article 8). Les renseignements pour les travaux ne comportant pas de certificat et prévus à l'article 9 du règlement sont donnés ci-dessous page 194. Le certificat d'essai peut être refusé par le Laboratoire si l'appareil ou la machine ne porte aucun signe d'identification ou si l'appareil ne présente pas une constance suffisante dans ses indications (frottement anormal, irrégularité due au pivotage, etc.).

Les prix ou redevances des principaux essais ou étalonnements sont portés dans le tarif que l'on trouvera ci-après. Pour les travaux ou essais non prévus au tarif, le prix sera établi de gré à gré d'après le temps passé, les déboursés nécessaires et l'énergie dépensée. Pour certains travaux l'énergie est comptée à part au tarif suivant :

Courant continu fourni ou non par accumulateurs, le kilowattheure	1,25 fr
Courants alternatifs monophasés, fréquence 42 (Compagnie parisienne de distribution d'électricité), le kilowattheure, prix du secteur majoré de ..	10 pour 100
Courants alternatifs polyphasés ou d'une autre fréquence autre que 42, le kilowattheure, prix du secteur majoré de	100 pour 100

Quand plusieurs appareils identiques sont à essayer en même temps, le prix de l'essai du premier appareil est celui du tarif, les prix de l'essai des appareils suivants font l'objet d'une réduction de 25 pour 100 sur le prix du tarif. Les dérogations à cette règle sont indiquées au tarif s'il y a lieu.

Sauf indications contraires, les essais sont effectués à la température des salles du Laboratoire.

Lorsqu'un essai doit être effectué en dehors du Laboratoire, le prix de l'essai est majoré dans les conditions indiquées à la page 194.

(1) Cette nouvelle édition du tarif (1919) annule les précédentes.

Provisoirement les prix du présent tarif sont majorés de 50 pour 100

B. — TARIF DES ESSAIS DONNANT LIEU A UN CERTIFICAT.

I. — Appareils de mesure.

1° AMPÈREMÈTRES.

Calibre.	Courant continu.	Courant alternatif.
Jusqu'à 100 ampères.....	8	15
— 500 —	10	20
— 1000 —	20	30
— 2000 —	30	40
— 5000 —	45	»

Remarques. — 1° Pour les appareils de plus de 5000 ampères, le programme doit être établi avec l'intéressé.

2° Pour les boîtes de contrôle d'intensité, ou les appareils à plusieurs sensibilités, l'étalonnage pour l'intensité la plus élevée est compté à plein tarif, les autres sensibilités, avec une réduction de prix de 50 pour 100.

2° VOLTMÈTRES.

Calibre.	Courant continu.	Courant alternatif.
Jusqu'à 150 volts.....	8	10
— 600 —	10	15
— 1000 —	20	25
— 10000 —	»	40
— 50000 —	»	60
— 100000 —	»	80

Remarque. — Pour les boîtes de contrôle de tension, ou les appareils à plusieurs sensibilités, l'étalonnage pour la tension la plus élevée est compté à plein tarif, les autres sensibilités, avec une réduction de 50 pour 100.

Essais spéciaux sur les ampèremètres et les voltmètres.

Étalonnage à une température différente de la température ordinaire : doubler le prix du tarif.

Essai d'amortissement.....	5 fr
Essai d'échauffement d'un shunt par le passage du courant maximum pendant une durée de 2 heures et jusqu'à 1000 ampères.....	30 fr
Au-dessus de 1000 ampères, programme à établir.	
Coefficient de variation du millivoltmètre avec la température.....	30 fr

3° COMPTEURS.

A. Les certificats d'étalonnement des compteurs à courant continu comprennent les essais à pleine charge et aux charges d'environ $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{10}$ et $\frac{1}{20}$.

B. Les certificats d'étalonnement des compteurs à courants alternatifs comprennent les essais à plein débit, et aux débits $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{10}$ et $\frac{1}{20}$ sans déphasage ($\cos \varphi = 1$) et au débit $\frac{1}{2}$ pour le déphasage $\cos \varphi = 0,5$.

Calibre		Courant continu			Courant alternatif	
en volts.	en ampères.	2 fils.	3 fils.	5 fils.	monophasé.	di ou triphasé.
		fr	fr	fr	fr	fr
250	10.....	10	15	20	20	40
	100.....	15	20	30	30	60
	1000.....	25	35	50	50	100
	2000.....	40	60	80	80	160
	5000.....	60	90	120	120	240
1000	10.....	15	22	»	25	50
	100.....	20	30	»	35	70
	1000.....	30	45	»	55	110
	2000.....	45	65	»	85	170
	5000.....	65	100	»	125	»
10000	10.....	»	»	»	35	70
	100.....	»	»	»	45	90
	1000.....	»	»	»	65	130
15000	10.....	»	»	»	50	100
	100.....	»	»	»	60	120
	1000.....	»	»	»	80	160

C. Les réductions ordinaires du tarif s'appliquent aux essais précédents.

D. Pour tous les essais spéciaux tels que :

- Influence de la température,
- Influence de la verticalité,
- Influence d'un champ magnétique,
- Influence d'une variation de tension.
- Influence d'une variation de fréquence,
- Influence d'un déséquilibre de charge en circuits polyphasés.
- Effet d'un court circuit,
- Etude de la marche d'un compteur pendant un temps déterminé,

les prix sont fixés suivant le programme.

E. *Par exception* : 1° Des essais réduits de compteurs ne donnant pas lieu à certificat sont prévus dans le tableau des prix, page 180.

2° Certains essais de compteurs effectués en dehors du Laboratoire, mais dans Paris, sont tarifés ci-après.

*Vérification des compteurs électriques à courant continu ou alternatif monophasé
à basse tension, installés sur les secteurs de Paris.*

Calibre du compteur.		2 fils.	3 fils.	5 fils.
0 à	10 ampères.....	fr 10	fr 15	fr 20
0 à	30 —	15	20	30
0 à	100 —	20	30	40
0 à	1000 —	30	45	60

Réduction pour une deuxième vérification dans l'année... 20 pour 100
— troisième — ... 30 —

Les frais de déplacement, 5 fr au maximum, nécessités pour le transport des appareils et ingénieurs *sont seuls* ajoutés aux prix ci-dessus.

Essais réduits.

Des essais réduits ne comportant pas de certificat, mais un simple bulletin constatant que les erreurs des indications du compteur ne dépassent pas les limites prévues par l'arrêté ministériel du 30 mai 1914, actuellement en vigueur, peuvent être effectués sur des lots *d'au moins cinq compteurs identiques*. Ces essais ne s'appliquent qu'aux compteurs dont les types ont été approuvés par le Ministre des Travaux publics sur la proposition du Comité d'Electricité. Après la vérification le compteur *est plombé*.

A. Pour les compteurs à *courant continu*, les épreuves réduites comprennent les essais aux charges $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{20}$.

B. Pour les compteurs à *courants alternatifs*, les épreuves réduites comprennent les essais aux débits de $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{20}$ sans déphasage ($\cos \varphi = 1$) et au débit de $\frac{1}{2}$ pour le déphasage $\cos \varphi = 0,5$.

C. Les prix de base pour ces essais sont donnés dans le Tableau suivant :

Calibre		Courant continu			Courant alternatif	
volts.	ampères.	2 fils.	3 fils.	5 fils.	monophasé.	di ou triphasé.
		fr	fr	fr	fr	fr
250	10	5	10	15	15	20
	100	10	15	20	20	30
	1000	15	20	30	30	50

Réduction dans le cas de plusieurs essais identiques.

Du 1 ^{er} au 5 ^e compteur (par compteur).....	plein tarif.
Du 6 ^e au 10 ^e compteur (—) réduction.....	20 pour 100.
Du 11 ^e au 20 ^e compteur (—) —	25 pour 100.
Du 20 ^e et au delà (—) —	30 pour 100.

4° WATTMÈTRES.

Le prix de l'étalonnement des wattmètres est celui des essais complets de compteurs (voir ci-dessus, p. 179).

Remarque. — Wattmètre à plusieurs sensibilités : l'étalonnement correspondant à la plus grande intensité du courant et à la tension la plus élevée est compté à plein tarif, les autres sensibilités avec une réduction de 50 pour 100.

Essai d'un ensemble d'appareils fonctionnant sur les mêmes transformateurs de potentiel ou d'intensité (compteurs, wattmètres, enregistreurs ou non, ampèremètres, phasemètres, relais, voltmètres, indicateurs de synchronisme, etc.).

Pour le compteur ou le wattmètre, tarif des essais complets de compteurs. Pour les autres appareils, réduction de 50 pour 100 sur les prix du tarif.

5° PHASEMÈTRES.

Même tarif que pour les wattmètres.

6° TRANSFORMATEURS DE MESURE.

Étude d'un transformateur de mesure comportant la détermination du rapport de transformation et du déphasage, effectué par la méthode d'opposition, pour une fréquence et une impédance extérieure données.

Tarif des essais des transformateurs de mesure.

Transformateurs de tension			Transformateurs d'intensité	
jusqu'à	monophasé.	di ou triphasé.	jusqu'à	Monophasé.
volts	fr	fr	ampères	fr
250.....	20	40	10.....	20
1000.....	25	50	100.....	30
10000.....	35	70	1000.....	50
15000.....	50	100	2000.....	80
			5000.....	120

Pour les essais à différentes fréquences ou différentes impédances du circuit secondaire, l'essai au régime le plus élevé est compté à plein tarif, les autres avec une réduction de 50 pour 100.

7° OHMMÈTRES.

Étalonnement d'un ohmmètre.....	10 ^{fr}
Par sensibilité supplémentaire.....	5 ^{fr}

8° CONDENSATEURS.

Appareils d'une capacité supérieure à un dixième de microfarad (pour une capacité inférieure à un dixième une entente préalable est nécessaire) :

Mesure de la capacité d'un condensateur.....	20 ^{fr}
Pour les capacités supplémentaires du même appareil.....	10 ^{fr}

9° SELF-INDUCTION.

Coefficient de self-induction d'une bobine sans fer 20^{fr}

10° TÉLÉGRAPHIE SANS FIL ET HAUTE FRÉQUENCE.

Ondemètres.	{	Étalonnement jusqu'à 3000 ^m	50 ^{fr}
	{	Au delà de 3000 ^m	80
Ampèremètres.		Étalonnement jusqu'à 25 ampères, à la fréquence 100 000.....	30
Condensateurs.		Mesure de la capacité en haute fréquence.....	30
Self-induction.		Mesure du coefficient en haute fréquence.....	30

II. — Mesures industrielles.

1° ESSAIS DE MACHINES.

Les essais prévus aux Tableaux des prix page 183, comprennent :

Pour les générateurs :

La caractéristique à vide;

La caractéristique en court circuit (pour les alternateurs);

La variation de tension pour des variations de charge (déterminée par des mesures directes);

L'essai de **fonctionnement** en charge (pendant 7 heures au maximum) et la mesure des échauffements;

La détermination du rendement par la méthode des pertes séparées;

L'épreuve des isolants est tarifée séparément 10 fr à moins que l'essai n'ait lieu sur la plate-forme d'essai de l'usine de construction: elle est comprise alors dans le prix du tarif.

Pour les moteurs :

La caractéristique à vide s'il y a lieu;

L'essai de fonctionnement en charge (pendant 7 heures au maximum), la mesure des échauffements, et du facteur de puissance pour les moteurs à courants alternatifs;

La détermination du rendement par la méthode des pertes séparées;

L'épreuve des isolants dans les mêmes conditions que ci-dessus.

Pour les transformateurs :

L'essai en court circuit;

La variation de tension, pour des variations de charge (déduites indirectement des mesures par le calcul);

L'essai de fonctionnement en charge (pendant 10 heures au maximum) et mesures des échauffements;

La détermination du rendement par la méthode des pertes séparées;

L'épreuve des isolants dans les mêmes conditions que ci-dessus.

Observations. — 1° Lorsque l'essai des machines et des transformateurs a lieu au Laboratoire, le prix du tarif est majoré du coût de l'énergie consommée pendant l'essai en charge.

2° Lorsque l'essai des machines et des transformateurs a lieu en dehors du Laboratoire, au prix du tarif s'ajoutent les indemnités ou frais prévues page 194.

GÉNÉRATEURS.

Puissance de la machine en kva.	Courant alternatif					
	Courant continu		monophasé		di ou triphasé	
	jusqu'à 600 volts.	jusqu'à 1500 volts.	jusqu'à 250 volts.	jusqu'à 5000 volts.	jusqu'à 250 volts.	jusqu'à 5000 volts.
	fr	fr	fr	fr	fr	fr
0 à 10.....	70	Prix à fixer de gré à gré.	80	120	100	150
10 à 100.....	100		120	160	150	200
100 à 250.....	150		175	200	200	250
250 à 500.....	200		200	250	250	300
500 à 1000.....	250		250	300	300	350
1000 à 1500.....	300		300	350	350	400
1500 à 2000.....	350		350	400	400	450

MOTEURS.

Puissance de la machine en kva.	Courant alternatif					
	Courant continu		monophasé		di ou triphasé	
	jusqu'à 600 volts.	jusqu'à 1500 volts.	jusqu'à 250 volts.	jusqu'à 5000 volts.	jusqu'à 250 volts.	jusqu'à 5000 volts.
	fr	fr	fr	fr	fr	fr
0 à 10.....	60	Prix à fixer de gré à gré.	65	100	80	125
10 à 100.....	75		80	135	100	175
100 à 250.....	100		120	160	150	200
250 à 500.....	150		175	200	200	250
500 à 1000.....	200		200	250	250	300
1000 à 1500.....	250		250	300	300	350
1500 à 2000.....	300		300	350	350	400

TRANSFORMATEURS.

Puissance de la machine en kva.	Courant monophasé		Courant di ou triphasé	
	jusqu'à 250 volts.	jusqu'à 5000 volts.	jusqu'à 250 volts.	jusqu'à 5000 volts.
	fr	fr	fr	fr
0 à 10.....	80	100	100	120
10 à 100.....	100	135	135	170
100 à 250.....	130	160	160	200
250 à 500.....	150	185	185	230
500 à 1000.....	175	220	220	270
1000 à 1500.....	200	240	240	300
1500 à 2000.....	225	280	280	350

Les *essais spéciaux*, les essais de réception d'une installation complète, les essais de moteurs au frein de Prony, les mesures d'un couple de démarrage ne peuvent pas être tarifées à l'avance; leurs prix s'établissent au moment de l'élaboration du programme d'essai.

MAGNÉTOS D'ALLUMAGE.

Les essais de ces petites machines sont faits sur programme spécial. On trouvera ci-dessous comme exemple le programme de deux séries d'essais.

Prix de la première série, essais principaux	150 ^{fr}
Prix de la deuxième série, essais complémentaires.....	100
Les deux séries ensemble.....	225

La *première série* comprend :

- 1° Un essai de fonctionnement de 8 heures à vitesse normale sur éclateur réglé à 8mm.
- 2° Des relevés oscillographiques à vitesse normale :
 - a. Du courant secondaire dans l'étincelle;
 - b. Du courant primaire de court circuit;
 - c. De la force électromotrice primaire.
- 3° La mesure pour différentes vitesses :
 - a. Du courant de court circuit primaire;
 - b. De la force électromotrice primaire;
 - c. De la force électromotrice secondaire avec primaire à circuit ouvert, puis primaire en court circuit.
- 4° Détermination de la vitesse minimum de fonctionnement sur l'éclateur réglé à 2mm.

La *deuxième série* comprend :

- 1° Une épreuve de tension à 15 000 volts pendant 10 minutes entre la masse de la machine et :
 - a. La couronne du distributeur;
 - b. Le porte-balais secondaire;
 - c. La bague collectrice secondaire,
- 2° La mesure de la capacité du condensateur.
- 3° L'épreuve de tension à 300 volts, 42 périodes, 10 minutes entre les électrodes du condensateur.
- 4° La mesure des résistances des enroulements primaire et secondaire.
- 5° Une comparaison au balistique des propriétés magnétiques des aimants.
 - a. Aussitôt après le démontage de la machine;
 - b. 48 heures après, les aimants étant restés à circuit ouvert.

2° RELEVÉS A L'OSCILLOGRAPHE.

Le Laboratoire peut relever photographiquement à l'oscillographe une, deux, ou trois courbes périodiques simultanées sur le même cliché ou la même pellicule. Un cliché permet d'enregistrer environ 2 périodes.

Une pellicule a environ 1 mètre de développement et permet d'enregistrer efficacement 50 périodes successives.

Frais fixes pour l'utilisation de l'oscillographe au Laboratoire	25 ^{fr}
Recherche des harmoniques d'une courbe périodique.....	60
Par courbe supplémentaire.....	30

L'emploi de l'oscillographe en dehors du Laboratoire entraîne un supplément spécial de 25 fr.

Les frais de clichés ou d'épreuves sont comptés en plus sur les prix de base suivants :

Par cliché.....	5 ^{fr}
Par pellicule.....	20

3° ESSAIS DE PILES ET D'ACCUMULATEURS.

PILES.

Courbe de la différence de potentiel aux bornes d'un élément de pile fermé sur une résistance fixe	20 ^{fr}
Détermination de la capacité en quantité d'électricité (ampèreheures) ou en énergie (wattheures) fournie par un élément de pile fermé sur une résistance fixe...	30
Essais d'un élément de pile avec un régime intermittent : Prix à fixer d'après le programme à réaliser.	

ACCUMULATEURS.

Charge fournie à l'accumulateur (énergie non comprise).....	10 ^{fr}
Détermination de la capacité fournie par un accumulateur à la décharge.....	10
Charge ou décharge non mesurée (énergie non comprise).....	5

Exemple d'un programme d'essais d'accumulateurs.

L'élément complet, mais sans électrolyte, pèse environ 10 kg.

1° *Mise en état de l'élément.*

Le programme doit être établi par le constructeur. On peut l'évaluer approximativement à :

Trois charges non mesurées (régime 10 ampères).....	15 ^{fr}
Énergie évaluée à.....	10
Trois décharges non mesurées (régime 10 ampères)....	15
	<u>40</u>

2° *Détermination de la capacité.*

a. Mesure de la capacité de l'élément en quantité et en énergie (ampèreheures et wattheures) pour trois décharges consécutives au régime de 20 ampères (durée évaluée à heures).

b. Même mesure au régime de 30 ampères (durée évaluée à heures).

c. Même mesure au régime de 50 ampères (durée évaluée à heures).

Soit :

Neuf décharges mesurées, 3 à 10 et 6 à 7,50.....	75 ^{fr}
Neuf charges non mesurées, 1 à 5 et 8 à 3,75.....	35
Énergie évaluée à.....	17
	<u>127</u>

3° Essais d'endurance.

L'élément sera soumis au traitement suivant :

Décharge. — L'élément sera déchargé pendant 2 heures à régime constant de manière à lui faire débiter 80 pour 100 de sa capacité.

Ou bien l'élément sera déchargé pendant 2 heures à régime variable pendant des intervalles de temps réglés de manière à faire débiter un nombre d'ampères heures total de 80 pour 100 de la capacité.

Charge. — Intensité constante pendant 5 heures.

Ou bien charge à différence de potentiel constante pendant 5 heures.

Après 48 opérations semblables (4 semaines), on fera deux décharges mesurées au régime de 20 ampères pour constater la baisse de capacité.

Pour la première série (énergie comprise).....	300 ^{fr}
Pour les séries suivantes de 50 décharges.....	250 ^{fr}

Remarque. — Les opérations d'endurance charge et décharge peuvent être effectuées par un appareil automatique à marche continue. Trois opérations complètes en 24 heures.

En plus par série de 50 décharges.....	100 ^{fr}
--	-------------------

L'élément peut être placé sur une plate-forme trépidant imitant les secousses des voitures.

Supplément pour 50 décharges.....	300 ^{fr}
-----------------------------------	-------------------

Essais divers.

Rendement d'un accumulateur en quantité ou en énergie;

Essai de conservation de charge;

Variation de la capacité avec la température moyenne de l'élément.

Le prix ne peut en être fixé qu'après entente avec les intéressés et détermination des détails du programme.

4° ESSAIS PHOTOMÉTRIQUES.

I. — LAMPES A INCANDESCENCE.

1° Lampes étalons secondaires.

Lampe étalon à <i>filament de carbone</i> de 10 ou de 20 bougies, établie par le Laboratoire central d'Électricité (constance probable de l'intensité lumineuse pendant au moins 200 heures).....	25 ^{fr}
Lampe à <i>filament métallique</i> de 20 et de 50 bougies, établie par le Laboratoire central d'Électricité (constance probable de l'intensité lumineuse pendant au moins heures).....	30
Lampe envoyée par l'intéressé et destinée à servir d'étalon secondaire :	
La lampe, étudiée pendant un minimum de 50 heures d'allumage et un maximum de 100 heures, subit au minimum trois mesures photométriques jusqu'à l'établissement probable du régime stable, mais sans aucune garantie de durée..	25
L'énergie est facturée en plus.....	

2° Lampes à incandescence industrielles.

Lampes de 5 à 250 volts : Catégorie A de 5 à 100 bougies. Catégorie B de plus de 100 bougies.

Photométrie.

	Catégories	
	A.	B.
Intensité lumineuse et puissance consommée pour une différence de potentiel donnée :		
Première lampe.....	5 ^{fr} »	10 ^{fr} »
Par lampe supplémentaire de même tension et de même puissance....	2,50	5 »
Détermination de la tension et de la puissance dépensée correspondant à une intensité lumineuse donnée :		
Première lampe.....	10 »	20 »
Par lampe supplémentaire de même intensité lumineuse.....	5 »	10 »
Variation de l'intensité lumineuse et de la puissance consommée entre deux tensions limites.....	15 »	25 »
Courbe de répartition lumineuse dans un plan.....	25 »	35 »
Intensité moyenne sphérique et puissance dépensée pour une tension donnée (lumenmètre diffusant Blondel) :		
Première lampe.....	5 »	
Par lampe supplémentaire.....	2,50	

Essais de durée.

Essais photométriques de la lampe neuve :		
Première lampe.....	5 »	10 »
Par lampe supplémentaire, même tension, même puissance.....	2,50	5 »
Essais photométriques en cours d'allumage suivant programme :		
Première lampe.....	2,50	5 »
Par lampe supplémentaire.....	1,25	2,50

L'énergie consommée par les lampes est calculée sur le prix de base suivant :

Courant continu à tension constante fourni par des accumulateurs, le kilowatt-heure.....	1 ^{fr} ,25
Courants alternatifs de la C. P. D. E. avec les irrégularités du courant fourni au laboratoire mais amené par transformateur à la tension de la lampe : Prix du kilowattheure de la C. P. D. E. majoré de 10 pour 100.	
Courants alternatifs de la C. P. D. E. régularisés par un régulateur Routin : Prix du kilowattheure de la C. P. D. F. majoré de 15 pour 100 pour la puissance dépensée. On ajoutera au prix de l'énergie 0,25 fr de supplément par heure de fonctionnement du régulateur (dépense d'énergie du régulateur, surveillance et entretien).	

Essais divers.

Résistance mécanique du filament. Détermination effectuée au moyen de l'appareil de choc « Legrand » : Pour la première lampe.....	3 ^{fr}
Par lampe supplémentaire.....	1,50
Essais du vide. Vérification au moyen de la bobine d'induction : Prix suivant programme.	
Mesure de la résistance d'isolement de la lampe : Prix suivant programme.	

Vérification des clauses d'un marché de lampes.

Recherche de la tension correspondant à une intensité lumineuse donnée ou intensité lumineuse correspondant à une tension donnée, sur des lots d'au moins 10 lampes semblables prélevées sur les lampes du marché. Indication sur le *bulletin d'essai* du nombre de lampes conformes au marché et du nombre des lampes en dehors des limites :

Première lampe.....	fr 5
Jusqu'à la 20 ^e lampe, par lampe, de même puissance.....	0,50
A partir de la 21 ^e , par lampe.....	0,30

3° Petites lampes à incandescence.

Tension de 0 à 5 volts.

Mesures photométriques. Intensité lumineuse et puissance consommée à une différence de potentiel donnée : Première lampe.....	fr 2
Par lampe supplémentaire de même tension.....	1
Essai de durée. Courant continu fourni par les accumulateurs par lampe et par jour d'essai : (somme minimum 2 fr).....	0,50

II. — LAMPES A ARC.

1° Lampes à arc.

Courbe de répartition lumineuse d'une lampe à arc dans un plan vertical, calcul de l'intensité lumineuse moyenne sphérique, puissance dépensée, consommation moyenne du charbon par heure.....	fr 75
Enregistrement pendant une heure sur un même graphique de l'intensité du courant et de la différence de potentiel aux bornes de 1, 2 ou 3 lampes en série sur courant continu.....	40

2° Charbons pour arc.

Détermination de l'usure horaire et de la durée totale d'une paire de charbons pour arc fonctionnant à un régime déterminé dans une lampe (énergie en plus).....	fr 20
Flux lumineux produit par une paire de charbons pour arc fonctionnant à un régime déterminé. Essais au lumenmètre Blondel :	
Premier régime.....	30
Régime supplémentaire.....	15

III. — SOURCES LUMINEUSES DIVERSES.

1° Lampes étalons à flamme.

Étalonnement à un régime de combustion défini.....	fr 30
Étalonnement d'une intensité lumineuse donnée.....	40

2° Mesures de l'éclairement.

Mesure de l'éclairement en un point ou de l'éclat intrinsèque d'une surface (brillance).....	fr 10
Mesures faites en dehors du Laboratoire, mais dans Paris (frais de transport seulement en plus) :	
Première mesure	30
Par mesure supplémentaire.....	20

3° Projecteurs et appareils.

Étude sommaire dans deux plans rectangulaires du faisceau lumineux d'un projecteur.	fr 50
Détermination de l'éclairement de l'écran d'un appareil de projections ou d'un cinématographe arrêté ou en fonctionnement : Prix à fixer suivant programme.	

III. — Essais de matériaux.

1° CONDUCTEURS.

Mesure de la résistivité à la température ordinaire	fr 20
Mesure de la résistivité à la température ordinaire avec coefficient de variation avec la température.....	40
Mesure de la résistance d'un conducteur ou d'une bobine de plus de 1 ohm à la température ordinaire (sans détermination de longueur, ni de section).....	5
Mesure de la résistance d'un conducteur ou d'une bobine de moins de 1 ohm à la température ordinaire (sans détermination de longueur, ni de section).....	10
(Les mesures de résistance ci-dessus ne s'appliquent qu'aux fils, câbles, rubans, ou barres, etc., à l'exclusion des résistances étalons et des shunts.)	
Détermination de la résistance d'isolement après une immersion de 24 heures dans de l'eau à la température ordinaire.....	fr 25
Dans de l'eau à une température donnée.....	50

Recherche de la rigidité diélectrique, ou de la tension de percement par l'étincelle, ou épreuve de tension, voir ci-dessous les Tableaux relatifs aux « isolants » (p. 190).

Le même tarif s'applique.

2° ISOLANTS.

A. — Isolants solides.

Les matériaux isolants soumis aux essais devront avoir les formes et les dimensions indiquées par le Laboratoire.

Détermination de la <i>résistivité</i> à la température ordinaire.....	fr 30
A une température donnée, ou variation avec la température, prix suivant programme.	
Détermination du <i>pouvoir inducteur spécifique</i> mesurée au moyen de la balance de Pellat	30

Recherche de la tension de percement de l'isolant (par élévation progressive de la tension :

Prix pour une tension de :	Premier échantillon.	Échantillon supplémentaire.
	fr	fr
0 à 50 000 volts.....	40	20
De 50 000 à 100 000 volts.....	60	30
Plus de 100 000 volts.....	80	40

Épreuve de tension. — Les échantillons de matière isolante sont soumis pendant 15 minutes au maximum à une tension fixée.

Prix pour une tension de :	Premier échantillon.	Échantillon supplémentaire.
	fr	fr
0 à 50 000 volts.....	20	10
De 50 000 à 100 000 volts.....	30	15
Plus de 100 000 volts.....	40	20

Remarque. — Les prix des deux Tableaux ci-dessus s'appliquent aux essais de fils ou de câbles isolés.

En principe les échantillons sont éprouvés successivement.

L'épreuve de tension ne donne lieu qu'à un bulletin d'essai.

Essais divers. — L'effet de la température, l'influence de l'humidité, la détermination de la porosité, l'effet de l'électrolyse, etc., donnent lieu à des essais dont le prix est fixé suivant programme.

B. — Isolants liquides.

Les essais des isolants liquides se font dans les mêmes conditions de prix que les isolants solides.

Essai d'huile. — L'essai à la tension, la recherche de la tension d'amorcement de l'arc entre deux disques de laiton verticaux et parallèles est tarifé 30 fr.

Diamètres des disques.....	1 cm
Distance des disques.....	0,5 cm
Quantité d'huile nécessaire pour l'essai.....	5 litres

Sur demande, l'huile peut être desséchée par étuvage avant l'essai.

3^e ISOLATEURS.

L'isolateur est en principe monté sur sa ferrure.

Détermination à la température ordinaire de la résistance d'isolement de l'isolateur (à sec).....	fr 20
Sous la pluie.....	30

Recherche de la tension de percement ou d'amorcement de l'arc :

Prix pour une tension de :	A sec.	Sous la pluie.
0 à 50 000 volts.....	fr 40	fr 60
50 000 à 100 000 volts....	60	90
Au delà de 100 000 volts.....	80	120

Essai à la tension pendant 15 minutes au maximum d'un isolateur soumis à une tension fixée, les prix précédents s'appliquent avec une réduction de 50 pour 100, les isolateurs sont en principe essayés successivement avec le montage habituel.

Épreuve de tension pendant 15 minutes au maximum d'un lot d'isolateurs d'au moins 25 pièces soumis en parallèle à la tension. En principe les isolateurs, non munis de ferrure, sont renversés et les contacts pris avec de l'eau.

Pour une tension de :	Premier isolateur.	Isolateurs supplémentaires.
0 à 50 000 volts.....	fr 20	fr 1
50 000 à 100 000 volts.....	30	1,50
Au-dessus de 100 000 volts.....	40	2

Remarque. — La tension d'épreuve peut être fixée après l'essai complet du premier isolateur, dans ce cas le prix d'essai du premier isolateur n'est plus compté dans celui de l'épreuve du dernier Tableau.

Les résultats de l'épreuve sont consignés sur un Bulletin.

Le Laboratoire ne garantit pas la casse et le déballage et réemballage sont à la charge de l'intéressé.

4° ESSAIS MAGNÉTIQUES.

Les échantillons pour l'essai au perméamètre doivent avoir les dimensions : Section 1×1 cm². Longueur, 20 cm. Pour les tôles longueur, 20 cm. Largeur, 1 cm en nombre suffisant pour donner 1 cm de fer.

Pour l'essai classique sous forme de tore, les dimensions de l'anneau sont :

Diamètre extérieur.....	15 cm
Diamètre intérieur.....	13
Épaisseur du métal.....	3

L'anneau doit être tourné; si ce sont des tôles, donner un nombre suffisant de rondelles pour faire 3 cm d'épaisseur de fer.

Pour la détermination des pertes totales au wattmètre, les dimensions de l'échantillon doivent être les suivantes :

Diamètre extérieur.....	30 cm
Diamètre intérieur.....	28 cm

Nombres de tôles suffisant pour que le poids de l'échantillon soit de 10 kg environ.

Détermination de la courbe de perméabilité :	fr
Au moyen d'un perméamètre	40
Au moyen du galvanomètre balistique et d'un anneau	50
Détermination de la courbe d'hystérésis (anneau)	60
Détermination des pertes totales par la méthode du wattmètre à fréquence industrielle pour une induction donnée	80
Pour deux inductions	120
Détermination de la perméabilité et des pertes par hystérésis aux fréquences comprises entre :	
500 à 1000	75
5000 à 100000	100

Étude d'un acier pour aimant permanent. — Échantillon sous la forme d'un barreau cylindrique de 20 cm de long et de 1 cm de diamètre :

Détermination au milieu du barreau de la force coercitive et de l'intensité d'aimantation rémanente après aimantation à saturation

30^{fr}

Remarque. — Les aciers n'ayant de propriétés magnétiques définies que lorsqu'ils ont été recuits après trempe pendant environ 30 heures à 500°, cette opération peut être faite par le Laboratoire moyennant une majoration de 5 fr.

5° ISOLEMENT DES CANALISATIONS.

Vérification dans Paris de l'isolement des canalisations électriques installées sur les secteurs de Paris :

Calibre du compteur.	2 fils.	3 fils.	5 fils.
	fr	fr	fr
0 à 10 ampères	15	20	30
0 à 30 —	20	30	40
50 —	25	35	50
100 —	30	45	60
200 —	40	60	80
400 —	55	85	110
600 —	75	110	150
800 —	100	150	200
1000 —	125	185	250

Remarques. — Les mesures d'isolement s'arrêtent au dernier interrupteur bipolaire.

Remise pour une deuxième vérification dans l'année : 20 pour 100.

Remise pour une troisième vérification dans l'année : 30 pour 100.

Ces prix sont majorés seulement des frais de transport et de déplacement.

Vérification dans Paris d'un compteur et des isolements d'une installation d'éclairage :

Calibre du compteur.	2 fils.	3 fils.	5 fils.
	fr	fr	fr
0 à 10 ampères	20	»	»
30 —	25	40	»
50 —	30	50	60
100 —	40	60	80
200 —	55	85	110
400 —	70	105	140
600 —	90	130	180
800 —	115	175	225
1000 —	140	200	275

Remis pour une deuxième vérification dans l'année : 20 pour 100.

Remise pour une troisième vérification dans l'année : 30 pour 100.

Ces prix sont majorés seulement des frais de transport et de déplacement.

Si l'installation comporte plusieurs compteurs, les prix sont établis de gré à gré.

Vérification de l'isolement de canalisations électriques ne rentrant pas dans les catégories ci-dessus :

Première mesure d'isolement.....	10 fr
Par mesure supplémentaire.....	5 fr

Pour les essais effectués en dehors du Laboratoire, voir les suppléments de prix page 194.

6° PARATONNERRES.

Détermination de la résistance électrique :

D'une prise de terre.....	fr 20
D'une pointe à la prise de terre	5
D'une portion de conducteur.....	5

L'intéressé doit mettre à la disposition du Laboratoire le personnel spécial nécessaire pour établir les connexions.

IV. — Mesures de précision.

1° RÉSISTANCE.

Étalonnement à la température ordinaire d'une bobine de résistance supérieure à un dixième d'ohm.....	fr 10
Étalonnement avec variation de la résistance avec la température.	40
Étalonnement à la température ordinaire d'une bobine de résistance inférieure à un dixième d'ohm et supérieure à un dix-millième	20
Étalonnement avec variation de la résistance avec la température.....	80
Étalonnement d'une boîte de résistance à plusieurs bobines : Frais fixes.....	25
Par bobine.....	2
Étalonnement à la température ambiante d'un étalon de résistance à fil métallique et variation avec la température.....	100

2° FORCE ÉLECTROMOTRICE.

Étalonnement à la température ordinaire d'un étalon de force électromotrice.....	25
Étalonnement à la température ambiante d'un étalon de force électromotrice et variation avec la température	100

V. — Essais effectués en dehors du laboratoire.

Lorsque les essais sont effectués en dehors du Laboratoire, les prix du tarif ci-dessus sont majorés des sommes suivantes :

	Chef de travaux.	Assistant.
1° Par jour d'absence.....	50 ^{fr}	25 ^{fr}
Par demi-journée.....	30	15
2° Frais de séjour.....	"	"
3° Frais de transport du personnel et du matériel.....	"	"

Par exception, comme on l'a dit dans le tarif, les indemnités d'absence du personnel ne sont pas exigées pour les vérifications des isolements des installations et pour les étalonnements de compteurs effectués à Paris.

Quand les essais se font la nuit, le tarif des indemnités d'absence est doublé.

VI. — Essais ou travaux non prévus au tarif.

Pour les essais ou travaux non prévus au tarif les prix seront déterminés provisoirement après fixation du programme suivant la nature du travail, les dépenses à engager, la durée probable. Ce prix, conformément au règlement, sera versé d'avance.

Le règlement définitif aura lieu à la fin du travail.

C. — TARIF DES TRAVAUX NE DONNANT PAS LIEU A CERTIFICAT.

Les intéressés peuvent être autorisés à effectuer des essais ne donnant pas lieu à certificat soit en travaillant eux-mêmes sans le concours du personnel du Laboratoire et dans les conditions prévues au règlement à l'article 9, soit avec le concours du personnel du Laboratoire.

Indemnité d'occupation des locaux du Laboratoire :

La journée de 8 heures.....	15 ^{fr}
La demi-journée de 4 heures.....	10
La semaine.....	50
Le mois.....	150

Les fournitures avancées par le Laboratoire sont facturées aux prix de revient. L'énergie électrique est comptée comme il a été dit dans les indications générales, page 177.

Le concours du personnel du Laboratoire pourra être obtenu, si les nécessités du service le permettent, dans les conditions suivantes :

	Chef de travaux.	Assistant.
Par journée de 8 heures	50 ^{fr}	25 ^{fr}
Par demi-journée de 4 heures	30 ^{fr}	15 ^{fr}

L'indemnité d'occupation des locaux donne droit à l'utilisation des canalisations diverses existant dans ces locaux, dans les limites où elles ne sont pas utilisées pour les services de laboratoire. L'utilisation du matériel et des instruments de mesure fera l'objet de conventions spéciales.

IL Y A TRENTE ANS.

Mars 1889. -- Un choix de la méthode à employer dans la mesure de la résistance des tissus organisés, par M. G. WEISS. — Éclairage électrique de l'Exposition universelle de 1889, par M. Hippolyte FONTAINE. — Sur la valeur industrielle et économique des machines dynamo-électriques, par M. R. ARNOUX.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.

SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.



LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)
PARIS 30 FR. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. • 32 FR.

Prix du numéro : 3 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de poste

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS,
LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits.

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine) et à LYON.

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

Pour la *Commande de :*

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines
installées en France
par la **Compagnie Electro-Mécanique**
et ses Licenciés.

plus de 1.200.000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Stations Centrales.

Transports de Force.

Traction électrique par courant
continu et par courant alternatif.

Éclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminaires.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commuatrices.

FILS ET CABLES

POUR L'ÉLECTRICITÉ

R. ALLIOT & ROL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

38, rue de Reuilly, 38

PARIS

TELEPHONE

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET C

QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55, A PARIS (6^e)

THOMSON (J.-J.). — Passage de l'Électricité à travers
les gaz. Traduit d'après la 2^e édition anglaise
par R. Fric, Ancien Elève de l'Ecole supérieure
d'Electricité, et A. Faure, Ancien Elève de l'Ecole
Polytechnique. In-8 (25-16) de x-694 pages
209 figures; 1912.....

TURPAIN (Albert). — Notions fondamentales sur
la Télégraphie envisagée dans son développement
son état actuel et ses derniers progrès (*De la
guet au Pollak et Virag et aux téléphotographies*)
(BIBLIOTHEQUE DE L'ÉLÈVE INGÉNIEUR). In-8 (32-16)
de 180 pages avec 122 figures; 1910.....

BIBLIOTHÈQUE TECHNOLOGIQUE

LEÇONS SUR LE FONCTIONNEMENT

DES

GROUPES ÉLECTROGÈNES EN RÉGIME TROUBLÉ

PERTURBATIONS, RÉGULATION, ASSERVISSEMENT, COMPENSATION

Par L. BARBILLION.

Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble, Directeur de l'Institut Electrotechnique.

VOLUME IN-8 (23-14) DE VI-300 PAGES, AVEC 166 FIGURES, CARTONNÉ; 1915..... 11 fr.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de l'Assemblée générale annuelle et de la réunion mensuelle du mercredi 2 avril 1919 : Admission de Membres titulaires, p. 198. — Sociétaires décédés et tués à l'ennemi, p. 198. — Distinctions honorifiques et promotions, p. 198. — Souscription à la chaire d'Électrotechnique, p. 199. — Fixation de la liste des fonctions pouvant être remplies par les membres de la Société et rétribuées conformément à l'Art. 7 des Statuts, p. 199. — Rapport de la Commission des Comptes (M. Marcel Meyer), p. 200. — Rapport du Comité d'administration (M. le Secrétaire général), p. 208. — Rapport sur le Laboratoire central et l'École supérieure d'Électricité (M. P. Janet), p. 212. — Nouvelles installations dans les grandes centrales américaines réalisées ou projetées durant ces trois dernières années (M. Sosnowski), p. 219. — Résultat des élections : MM. Benoit et Thury, membres d'honneur; renouvellement des membres du Bureau, du Comité d'administration et de la Commission des Comptes, p. 268. — Allocution de M. Larnaude, Président sortant, p. 270. — Programme d'électrification partielle des chemins de fer français; expérience actuellement acquise en France et à l'étranger dans l'électrification des grandes lignes (M. Mauduit), p. 273 (*suite*). — Correspondance, p. 304.

TABLEAU D'HONNEUR DES SOCIÉTAIRES VICTIMES DE LA GUERRE, p. 211.

SITUATION FINANCIÈRE ET BILAN DE LA SOCIÉTÉ AU 31 DÉCEMBRE 1918, p. 204.

IL Y A TRENTE ANS, p. 306.

COMPTE RENDU

DE

L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ANNUELLE

ET DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 2 avril 1919 (1).

PRÉSIDENCE DE M. A. LARNAUDE.

La séance est ouverte à 20 h 30 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

La séance est alors suspendue pendant quelques minutes pour permettre aux sociétaires présents de déposer dans l'urne leur bulletin de vote. Puis les bureaux du scrutin étant constitués il est donné suite à l'ordre du jour de la séance.

Sont élus membres titulaires de la Société :

MM.

Oliver (André), Sous-Lieutenant au 7^e bataillon du Génie, 14^e compagnie, secteur postal : 5. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Peaslee (W. Dhu Aine), Ingénieur Conseil, n° 125 E 11 st. Portland, Oregon (U. S. A.). — Présenté par MM. P. Janet et H. Weiss.

Rivière (Jean-Maurice), Agrégé de l'Université, 13, rue de la Redoute, à Saint-Cloud (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Abraham et Joly.

M. le PRÉSIDENT a le très vif regret de faire part des décès de MM. *Danne* (Jacques), *Dennis* (Félix) et *Tonnart* (André). Il annonce également la mort au champ d'honneur de MM. *Bioy* (J.-B.-P.) et *Héltas* (G.-H.).

Aux familles de nos collègues disparus, M. le Président exprime les condoléances de la Société.

M. le PRÉSIDENT fait part des distinctions honorifiques suivantes :

Sont inscrits au Tableau de la Légion d'honneur pour le grade de chevalier :

HERRGOTT (Joseph-Michel-Camille), capitaine d'artillerie à un groupe de bombardement :

« Servant au front sur sa demande, fait preuve, en toutes circonstances, d'un dévouement et d'une activité sans bornes. Grâce à sa compétence remarquable, rend des services très appréciés. »

PRIVÉ (Pierre), capitaine, 6^e régiment d'artillerie de campagne :

« Détaché pour appuyer directement, avec son groupe, l'infanterie, a fait preuve, au cours des opérations dans les Flandres, d'une initiative, d'une intelligence et d'une activité remarquables.

« Pendant un mois d'efforts, a réduit les nids de mitrailleuses par des tirs à vue et rendu ainsi possible une progression constante. Toujours en avant, stimulant son personnel par son exemple et son endurance, a obtenu le maximum d'effet et pris une part glorieuse au succès. Une blessure. Trois citations. »

M. le PRÉSIDENT signale également à l'Assemblée la promotion de M. le colonel Ferrié au grade de général de brigade. Il rappelle

les éminents services rendus par M. le général Ferrié à la défense nationale et exprime à ce dernier les plus chaudes félicitations de la Société.

M. le PRÉSIDENT fait connaître qu'il a reçu pour la chaire d'Electrotechnique la souscription suivante :

Maison Breguet..... 1000 francs.

Il adresse à ce généreux donateur les remerciements de la Société.

Conformément à l'article 7 des statuts, M. le Président propose à l'Assemblée générale de fixer la liste des fonctions pouvant être remplies par les membres de la Société et rétribuées. Ces fonctions sont les suivantes :

- 1^o *Ecole.* — Conférenciers et personnel enseignant.
- 2^o *Laboratoire.* — Directeur, chefs de travaux, assistants.
- 3^o *Société.* — Secrétaire du Comité.

Cette proposition est adoptée à l'unanimité.

RAPPORT DE LA COMMISSION DES COMPTES POUR L'EXERCICE 1918.

M. Marcel MEYER, rapporteur. — « Messieurs, nous avons l'honneur de vous rendre compte du mandat que vous avez bien voulu nous confier lors de votre Assemblée générale du 4 avril 1918.

» Nous avons contrôlé la régularité des écritures de notre comptabilité et constaté l'existence des différentes valeurs de portefeuille figurant à l'actif de la Société.

» Les comptes et bilan pour l'exercice 1918 sont classés en trois divisions :

- I. Services généraux;
- II. Laboratoire;
- III. École.

» Ils donnent lieu aux observations suivantes :

I. — Services généraux.

» L'*avoir* de ce compte, qui était au 1^{er} janvier 1918 de 266 704,71 fr, est passé au 31 décembre 1918 à 279 270,30 fr; il a donc augmenté de 12 565,59 fr.

» Cette augmentation se compose :

1 ^o Du bénéfice de l'exercice, soit.....	5346,79 ^{fr}
2 ^o De l'achat pour la bibliothèque	66,20
3 ^o D'un placement au fonds de réserve	1501,40
4 ^o D'un placement des arrérages des legs Hughes et Cheux, ensemble...	5651,20
	12565,59

» *Recettes*. — Les recettes de l'exercice se sont élevées à 45 391,27 fr, en y ajoutant le montant du placement des arrérages des legs Hughes et Cheux (5651,20 fr), on arrive au total de 51 042,47 fr.

» Les cotisations de l'exercice 1918 se sont élevées à la somme de 28 665 fr, en diminution de 435 fr sur celle de 1917.

» Les intérêts sont passés de 6146,90 fr en 1917 à 8138,90 fr en 1918.

» Les « souscriptions » pour le Laboratoire s'élèvent à 17 500 fr, en augmentation de 1850 fr sur le montant de celles de l'année dernière, tout en restant sensiblement inférieures au chiffre de l'année 1913. Il y a tout lieu d'espérer que, maintenant que la

situation se rétablit, le montant des souscriptions reviendra au chiffre ancien et même le dépassera.

» Permettez-nous de vous soumettre la liste complète des généreux donateurs auxquels nous adressons nos biens vifs remerciements :

Souscriptions reçues en 1918 pour le Laboratoire central d'Électricité.

Tréfileries du Havre.....	5 000 ^{fr}
Compagnie pour la fabrication des compteurs.....	2 000
Société d'Électricité de Paris.....	1 500
Compagnie Électro-mécanique.....	1 000
Compagnie parisienne de Distribution d'Électricité.....	1 000
Compagnie de Construction électrique.....	500
Compagnie de l'Est-Lumière.....	500
Compagnie de l'Ouest-Lumière.....	500
Geoffroy et Delore.....	500
Hillairet.....	500
Omnium Lyonnais.....	500
Société d'Éclairage et de Force par l'Électricité.....	500
Société française de l'Accumulateur Tudor.....	500
Société française des Applications industrielles.....	500
Société industrielle des Téléphones.....	500
Compagnie continentale des Compteurs.....	250
Compagnie électrique de la Loire et du Centre.....	250
Association amicale des Ingénieurs électriciens.....	200
Compagnie générale des Travaux d'éclairage et de force (anciens Établissements Clemançon).....	200
Société « L'Air liquide ».....	200
Alliot et Rol.....	100
Appareillage électrique Grivolat.....	100
Compagnie française des lampes à incandescence.....	100
Leclanché et C ^{ie}	100
L'Union électrique.....	100
Richard (Jules).....	100
Société des Accumulateurs électriques Dinin.....	100
Société de l'Électro-Câble.....	100
Société « Le Matériel Téléphonique ».....	100
	17 500

» *Dépenses.* — Les dépenses ont atteint 38 476,88 fr. Il y a lieu de remarquer que les frais correspondant au *Bulletin* ont passé de 9752,24 fr en 1917 à 14 384,18 fr en 1918; cette augmentation de 4631,94 fr est due en grande partie à l'élévation du prix du papier. Les autres dépenses ne demandent pas d'observation particulière.

» *Fonds de réserve.* — Ce fonds est constitué, au 31 décembre 1918, par :

191 cotisations libérées.....	fr 47970,00
4 cotisations demi-libérées.....	555,00
3 suppléments de cotisations.....	240,00
Dons sans affectation spéciale.....	4 149,50
1/10 du revenu des biens.....	1 141,40
	54 055,90

» Il est représenté par les valeurs suivantes :

46 obligations P.-L.-M. 3 pour 100.....	fr 14927,00
8 obligations Est 3 pour 100.....	2816,00
4 obligations Ouest-Algérie 3 pour 100.....	1 364,00
758 fr de rente 3 pour 100.....	15 551,65
410 fr de rente 5 pour 100.....	7 240,60
Espèces.....	58,89
	41 958,14

» Les titres ont été évalués d'après les cours au 31 décembre 1918, la différence entre ces cours et les cours d'achat étant portée, comme d'usage, à un compte d'ordre.

II. — Laboratoire.

» *L'avoir* de ce compte, qui était de 465 317,67 fr au 1^{er} janvier 1918, est passé à 465 740,67 fr au 31 décembre, par suite d'un achat de matériel.

» *Recettes.* — Les recettes se sont élevées à 189 258,32 fr, somme dans laquelle les redevances pour essais et étalonnements entrent pour 54 183,62 fr. Il y a lieu de remarquer que ces essais et étalonnements se rapportent pour la plus grande partie soit directement, soit indirectement aux besoins de la Défense nationale. Il est probable que, tout en continuant à effectuer des essais de cette nature, le Laboratoire sera appelé à effectuer des essais pour l'Industrie comme il le faisait en temps de paix et que les recettes reviendront bientôt à leur taux d'avant-guerre.

» *Dépenses.* — Les dépenses ont atteint 185 747,27 fr, laissant un solde créditeur de 35 11,05 fr qui a été reporté à l'exercice 1919. Comparativement à l'exercice 1917, il y a augmentation sur les frais d'opérations, augmentation correspondant à une augmentation des redevances. On a nécessairement continué à verser au personnel les allocations pour la vie chère, et l'exercice a supporté des dépenses plus élevées d'entretien des machines et appareils.

» Les dépenses d'acquisition d'instruments et de matériel sont la contre-partie des recettes du « Ministère de la Marine ». Il en est de même pour l'article « Amortissement. »

III. — École.

» L'*avoir* de ce compte, qui était de 361 502,48 fr au 1^{er} janvier 1918, est resté le même au 31 décembre.

» Les recettes se sont élevées à 66 999,95 fr, en augmentation de 8329,20 fr sur celles de 1917. Cette augmentation portant sur le Chapitre « Redevances des élèves et auditeurs » tient à l'augmentation du taux de ces redevances. Malgré cette augmentation, la Société a dû allouer à l'École une subvention de 4329,20 fr pour équilibrer les dépenses de l'exercice qui ont atteint 71 329,15 fr.

» Il est probable que ce déficit sera largement comblé dans les exercices prochains par les nombreuses demandes d'admission que recevra l'École.

» En résumé, les comptes de la Société en 1918 se groupent de la manière suivante :

PROFITS ET PERTES.

	Recettes.	Dépenses.	Différence.
	fr	fr	fr
Services généraux.....	51 042,47	38 476,88	+ 12 565,59
Laboratoire.....	189 258,32	188 833,62	+ 424,70
École.....	75 329,15	75 329,15	"
	<u>315 629,94</u>	<u>302 639,65</u>	<u>12 990,29</u>

AVOIR NET DES DEUX DERNIERS BILANS.

	Services généraux.	Laboratoire.	Écoles.	Total.
	fr	fr	fr	fr
1917.....	266 704,71	465 315,67	361 502,48	1 093 522,86
1918.....	<u>279 270,30</u>	<u>465 740,37</u>	<u>361 502,48</u>	<u>1 106 513,15</u>
Différence...	+ 12 565,59	+ 424,70	"	+ 12 990,29

» Vous confirmant ce que nous vous exposions au sujet de chacune des trois divisions, nous vous proposons d'approuver les comptes tels qu'ils vous sont présentés et d'exprimer à notre excellent Trésorier et à ses dévoués collaborateurs votre reconnaissance pour le zèle intelligent qu'ils apportent à la bonne gestion des finances de la Société. »

Mis aux voix, le Rapport de la Commission des Comptes est adopté à l'unanimité.

SITUATION FINANCIÈRE.

COMPTES DE L'EXERCICE 1918.

I. — Services généraux.

DÉBIT.

CRÉDIT.		
Cotisations libérées.....	fr	fr
Cotisations de l'exercice.....	360,00	14384,18
Intérêts.....	28665,00	1694,00
Produits du Bulletin.....	8138,90	7155,00
Don avec affectation spéciale.....	7550,30	994,50
Profits et pertes.....	1000,00	300,00
Souscriptions pour le Laboratoire..	677,07	7220,00
Intérêts du legs Hughes.....	17500,00	
» du legs Cheux.....	1770,00	
» de la Fondation Joubert...	1512,00	
	327,70	
	fr	fr
	67500,97	
Bulletin.....		
Frais d'administration.....		
Personnel.....		
Frais de correspondance.....		
Frais de réunions.....		
Cotisations irrécouvrables....		
Subventions :		
au Laboratoire.....	2625,00	
à l'Ecole.....	4329,20	
diverses.....	2400,00	
Bourse Hughes.....		9354,20
Bourse Joubert.....		430,00
PlACEMENT AU FONDS DE RÉSERVE :		163,85
Cotisations libérées.....	360,00	
1/10 ^e du revenu des biens..	1141,40	
Bibliothèque.....		1501,40
Réserve :		66,20
Bourse Hughes.....		
Bourse Cheux.....	1320,00	
Bourse Joubert.....	1512,00	
Souscriptions et don pour le	163,85	
Laboratoire.....	15875,00	18870,85
Solde créditeur.....		fr
		5346,79 67500,97

II. — Laboratoire.

CRÉDIT.		
Report de l'exercice 1917.....	fr	
Arrrages de la rente.....	1976,60	
Redevances pour essais et étalonne-	7966,90	
ment.....	64143,42	
Frais d'opérations et essais		
taxés :		
Machino à vapeur, moteurs à		
gaz et électrique.....		fr
		11048,05

Frais de bureau, correspon-	
dance et divers.....	2135,20
Chauffage.....	5802,35
Eau, électricité.....	722,75
Téléphone.....	547,60
Loyer, impôts, assurances.....	9207,90
Entretien des bâtiments.....	1032,15
Entretien des machines et	4602,80
appareils.....	1643,80
Profits et pertes.....	33,67
Acquisition d'instruments et	
matériel.....	100734,70
Amortissement :	
Constructions.....	2853,25
Instruments et matériel.....	10398,70
	3511,05
	189258,32

Solde créditeur reporté à 1919.

III. — École.

Redevances des élèves et auditeurs.	
Souscriptions.....	51571,05
Intérêts.....	6000,00
Subvention de la Ville de Paris.....	3275,19
Dons.....	2000,00
Profits et pertes.....	354,75
Section technique de l'Aéronau-	198,96
tique.....	3600,00
Subvention de la Société.....	4320,20
Radiotélégraphie :	
Subvention.....	4000,00
	75329,15

Personnel.....	
Travaux des élèves :	42165,25
Machine à vapeur, moteurs à	
gaz et électrique.....	1273,60
Produits.....	427,75
Atelier.....	1039,30
Conférences, projets, exa-	
mens, etc.....	12214,50
Fournitures diverses.....	4134,25
Frais d'administration :	19089,60
Frais de bureau, correspon-	
dance et divers.....	1766,00
Chauffage et éclairage.....	5394,65
Entretien des bâtiments.....	926,25
Entretien des machines et ap-	
pareils.....	353,15
Impôts, assurances.....	1334,25
Radiotélégraphie :	
Exploitation.....	92,25
Solde créditeur reporté à 1919.	3007,75
	4000,00
	75329,15
	332088,44

BILAN AU 31 DÉCEMBRE 1918.

I. — Services généraux.		PASSIF.	
ACTIF.			
Fonds de Réserve (valeur au 31 décembre 1918) :			
46 obl. P.-L.-M. 3 %.....	fr 14927,00	Cotisations anticipées.....	fr 230,00
8 obl. Est 3 %.....	2816,00	Créditeurs divers.....	1800,00
4 obl. Ouest-Algérien 3 %..	1364,00	Frais de publication.....	7909,19
758 ^{re} de rente 3 %.....	15551,65	Bourse Hughes.....	27,95
410 ^{re} de rente 5 %.....	7240,60	Fondation Cheux.....	56,80
Espèces.....	58,89	Fondation Joubert.....	163,85
Legs Hughes (valeur au 31 décembre 1918) :	fr 41958,14	Fonds affectés au Laboratoire.....	130177,45
		Fonds avec affectation spéciale.....	786,80
			141152,04

Créditeurs divers.....	55730,20
Ministère de la Marine...	116046,60
Solde reporté à 1919.....	3511,05
	<u>175287,85</u>

Bibliothèque.....	2975,40
Constructions.....	240226,43
Instruments et matériel.....	338585,14
Caisse.....	28984,84
Débiteurs divers.....	29616,41
Cautionnement.....	640,00
	<u>641028,22</u>

III. — École.

Créditeurs divers.....	42591,75
Redevances des élèves pour 1919.....	16304,00
Radiotélégraphie.....	33678,35
	<u>92574,10</u>
	<u>409013,99</u>

Instruments et matériel.....	229704,80
Constructions.....	92961,70
Fonds de réserve (valeur au 31 décembre 1918):	
625 ^{fr} de rente 3 %.....	12822,90
46 obl. Orléans 3 %.....	16606,00
10 obl. Orléans 4 %.....	3960,00
12 obl. Nord 3 %.....	4008,00
10 obl. État 4 %.....	4000,00
Fonds disponibles (valeur au 31 décembre 1918):	41396,90
39 ^{fr} de rente 3 %.....	800,15
68 obl. Nord 3 %.....	22712,00
18 obl. Orléans 3 %.....	6498,00
20 obl. Orléans 4 %.....	7920,00
Caisse.....	37930,15
Débiteurs divers.....	419,68
Cautionnement.....	24410,50
Compte d'ordre.....	143,35
	<u>27109,50</u>
	<u>454076,58</u>
	<u>1515527,14</u>

Avoir net au 31 décembre 1918:

Services généraux.....	279270,30
Laboratoire.....	465740,37
École.....	361502,48
	<u>1106513,15</u>
	<u>1515527,14</u>

RAPPORT DU COMITÉ D'ADMINISTRATION.

M. le SECRÉTAIRE GÉNÉRAL. — « Messieurs, l'année qui vient de s'écouler a vu la fin de la terrible crise qui, depuis plus de 4 années, a bouleversé notre pays et quelque peu ralenti la vie normale de notre Société. Bien des nôtres sont tombés au champ d'honneur : nous nous inclinons avec émotion devant leur glorieuse mémoire. Notre *Bulletin* vous a dit leurs noms au fur et à mesure que nous parvenaient les fatales nouvelles. Aux Tableaux d'honneur déjà publiés les années précédentes, l'année 1918 ajoute le sien, qui, espérons-le, sera le dernier. Saluons la mémoire de nos collègues MM. *Bioy, Cabaret, Gauthier-Villars, Helitas, Lebrun* (Marcel), *Tavernier* (Ch.).

» En dehors de ces glorieuses victimes de la guerre, nous avons encore à déplorer le décès d'un grand nombre de nos membres. Et tout d'abord c'est notre président désigné, M. *Devaux-Charbonnel*, qui, frappé en pleine activité par une cruelle maladie à la fin de l'été dernier, vient de nous être enlevé. Ce sont encore MM. *Allaire, Belot* (Jacques), *Benoist* (G.), *Bonfante, Bonnet* (G.), *Claeys, Cohen-Jonathan, Danne, Darmezin du Rousset, Dennis* (F.), *Deprez* (Marcel), *Drouard, Dupont-Buèche, Foucault* (R.), *Girard* (Ch.), *Jannettaz, Lequeur* (P.), *Martel* (C.), *Mors* (L.), *Perronnet, Piaton, Sée* (R.), *Steynis, Tresca* (G.), *Tonnart, Vives y Navarro*.

» Malgré ces pertes, notre Société maintient à peu près son effectif normal, grâce à nos jeunes collègues, qui ont eu à cœur de venir combler les vides de nos rangs et dont les admissions ont été relativement nombreuses dans ces derniers temps.

» Pourtant l'ère des difficultés n'est pas close. Notre Commission des Comptes vous a montré combien les retards apportés dans le paiement des cotisations rompaient encore l'équilibre de notre budget, dont les dépenses croissent peut-être plus vite que les recettes. Espérons que tout rentrera dans l'ordre à bref délai et qu'il ne restera bientôt de ce léger trouble financier que le souvenir reconnaissant que nous devons au concours généreux que notre Société a trouvé comme d'habitude auprès de ses vieux amis.

» Pour y apporter un remède plus normal et grouper toujours plus d'adhérents, nous nous efforcerons, quant à nous, d'augmenter l'intérêt de nos réunions et de notre *Bulletin* en rendant aux Sections du Comité, quelque peu dispersées par la guerre, leur

ancienne vitalité. Mais nous demandons pour cela à tous nos collègues de soutenir nos efforts et de s'intéresser plus particulièrement en ce moment à la vie de la Société, afin qu'elle puisse se hausser aussi rapidement que possible au rang qu'elle est appelée à tenir dans l'avenir.

» D'ailleurs, d'importantes questions se posent actuellement pour vos administrateurs et il importe que vous puissiez éventuellement leur apporter tous les concours désirables.

» Le pays, dans la personne de ses représentants, s'intéresse en ce moment aux Laboratoires techniques. Il est question de créer un vaste organisme central d'études et d'essais, englobant à la fois le Laboratoire du Conservatoire des Arts et Métiers et le Laboratoire central d'Électricité.

» D'autre part, en ce qui concerne l'École supérieure d'Électricité, d'importantes transformations sont à l'étude. Des achats de terrain, des projets de constructions ont déjà été envisagés. Bien qu'il soit encore prématuré d'en rendre compte officiellement, nous pouvons vous dire que votre Bureau et votre Comité assistent de toute leur activité notre très distingué directeur, M. Janet, dans l'étude des diverses solutions qui peuvent être proposées.

» Messieurs, quelles qu'aient été les difficultés matérielles résultant de la situation pour l'organisation des séances et la publication du *Bulletin*, notre dévoué secrétaire général, honoraire, M. Sabourain, s'est dépensé sans compter pour la Société pendant cette longue et dure période de la guerre, et il a réussi à vous amener une riche moisson de communications techniques qui font le plus grand honneur à nos conférenciers.

» La question du déphasage dans les réseaux à courant alternatif nous a valu les études de M. A. Léauté sur le transport de la puissance, et de M. Iliovici sur la tarification en fonction du cos φ .

» Notre président, M. Larnaude, nous a documenté sur l'état actuel de l'industrie des lampes à incandescence.

» M. Latour nous a décrit les machines asynchrones à bagues et, plus récemment, nous a exposé l'état actuel de la question des alternateurs à haute fréquence, sur le réglage desquels M. Bethenod vient de nous fournir un intéressant mémoire.

» M. H. Weiss a apporté une contribution originale à l'analyse des courbes périodiques.

» La question de l'emploi de l'aluminium dans l'industrie de l'électricité a fait l'objet d'un remarquable exposé de M. Dusaughey.

» Au point de vue des mesures en général et de leur application à

la construction de précision, notre vice-président, M. Guillaume, nous a fourni un intéressant rapport sur les calibres industriels de longueur.

» M. Brylinski a établi et discuté les formules correspondant à l'état permanent sur une ligne parcourue par un courant sinusoïdal.

» Revenant sur la question des mesures internationales effectuées à Washington en 1910, M. P. Janet nous a rappelé le rôle important joué dans la circonstance au point de vue national par le Laboratoire central d'Électricité.

» M. de Marchena, traitant de la marche en parallèle des alternateurs, a pu analyser quelques cas particuliers encore obscurs.

» M. Hurmuzescu nous a montré les ressources de la Roumanie au point de vue des applications de l'Électricité.

» M. Esbran a discuté les conditions d'application de la traction électrique à voie de 0,60 m.

» M. Ehrmann a présenté des remarques intéressantes sur le fonctionnement des machines polyphasées à collecteur.

» A la suite de ses remarquables travaux sur les piles et accumulateurs, M. Ch. Féry nous a communiqué les résultats de ses recherches et a amorcé sur cette question une discussion qui promet d'être féconde.

» Enfin dans la dernière séance, M. Mauduit nous a donné la substance de son rapport très documenté sur l'état actuel de la question de l'électrification des lignes de chemins de fer : encore un sujet qui nous vaudra sans doute d'intéressantes discussions.

» Comme vous le voyez, Messieurs, l'année a été fructueuse : nous comptons qu'avec la renaissance industrielle de nouvelles questions seront abordées qui ajouteront encore à l'intérêt de nos séances. Nous convions nos Collègues à les suivre assidûment et à participer aux discussions dans la plus large mesure, pour développer notre cohésion et notre production technique. »

Mis aux voix, ce Rapport est adopté à l'unanimité.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS.

TABLEAU D'HONNEUR

DES

SOCIÉTAIRES VICTIMES DE LA GUERRE.

(Au 1^{er} avril 1919.)

AMBRIÈRES (G.-M.-S.-E. Gouin d').
ANDRÉ (Émile).
BIOY (Jean-Baptiste-Paul).
BRENOT (Maxime-Charles).
BRIZON (René-Louis-Auguste).
BUREAU (Henri).
CABARET (André-Louis-Marie).
CAUSSE (Jules-Marie-Albert).
CHALON (Marie-Paul-André).
CHASSERIAUD (René).
CHEVAILLIER (Robert).
CHILLAZ (J.-L.-D. DE).
COHEN (Édouard).
COUSIN (Émile-Félix).
DELAMOTTE (Maurice-Désiré).
DESRUÉLLES (Marcel-Auguste).
DIOT (Marcel-Émile).
GAUTHIER-VILLARS (Albert).
GRAISNE DE BOURMONT (L.-H.-M.-A. DE).
GUILLOTEAU (Maxime).
GUINOCHET (René).
GUYAU (Auguste).
HELITAS (Gilbert-Henri).
HEUGUES (Robert-Paul-Joseph).
HUGUES (L.).
JANNY (Marcel).
JAULIN (Julien).
JAVAL (Jean-Félix).
JEGOU (P.).
JOUCLA (Jean).
LABOUR (Henri).
LANGUMIER (Paul-Émile).
LE BIGOT (Jean).
LE BOEUF (Pierre).

LEBRUN (Marcel).
LECOCQ (Georges).
LEGOUPI (Paul).
LETOUNEUR (André).
LOTH (Henri-Jules).
MAINGUENAUD (Pierre-Jean-Claude).
MAHOUEAU (Georges).
MARTINROCHE (Antonin).
MATHON (Jean-Pierre-Philippe).
MEYER (Georges).
MICHEL (Claude-Léon-Julien).
MILLIEN (Edmond).
MILON (Jean-Emmanuel-Marie).
MONTAGNE (M.).
MOULIN (Marcel-André).
OLLIVIER (Ernest).
PAQUIER (Étienne-Victor-Valentin).
PATOT (Henri).
PATY DE CLAM (E.-M.-Michel DU).
PERDRIZET (Paul-Émile-Auguste-André).
QUENARD (René-Alexandre).
REUSS (Paul).
REY (Alexandro-Silvain).
ROBIN (Félix).
ROCHAS (Victor).
RODET (Émile-Joseph).
SAINTÉ-CLAIRE DEVILLE (Charles-Henri).
SAUVÊTRE (G.).
SELMANN-LUI (G.-P.).
TAVERNIER (Charles).
TIREFORT (Camille-Marie-Eugène).
TISSERAND (Charles-Constant).
TOULON (André).

**RAPPORT ANNUEL SUR LE LABORATOIRE CENTRAL
ET L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ.**

M. P. JANET. — « Encore une fois, en commençant ce Rapport, nous devons apporter un hommage ému à ceux de nos anciens élèves qui sont tombés dans cette dernière année de guerre, ou dont la disparition a été confirmée. L'année 1918 a vu le triomphe de la grande cause que nous défendions, et ce n'est que justice d'y associer ceux qui, de toute la valeur de leur jeunesse, y ont contribué; ce sont :

	Promotion.
CABARET (André)	1906-1907
FOURNIER (Maurice)	1906-1907
DEPOIX (Georges)	1908-1909
TAVERNIER (Charles)	1908-1909
BELOT (Jacques)	1909-1910
DENARIE (Léon)	1910-1911
GILOTEAU (Georges)	1911-1912
MAËDER (Lucien)	1912-1913
MERLE (Max)	1912-1913
CHAPUT (Jean)	1913-1914
GOT	1913-1914
VERZEELE (Ernest)	1913-1914

» Bien que tous doivent être réunis dans une admiration égale, nous tenons à apporter ici un hommage particulier à Jean Chaput, l'illustre aviateur, qui nous a quittés, presque enfant, le 1^{er} août 1914, pour entrer, comme tant d'autres, dans l'arme nouvelle et aventureuse où il devait trouver la gloire et la mort : entre deux victoires, il ne manquait pas de revenir joyeusement à l'École revoir ses anciens maîtres et ses anciens camarades et leur raconter ses exploits comme la chose la plus naturelle et la plus divertissante du monde : belle insouciance, qui devait avoir une fin tragique et que nous ne pouvons aujourd'hui nous rappeler sans une profonde émotion.

» Mais l'École supérieure d'Électricité n'a pas seulement à se montrer fière de ses morts. Il me faudrait de longues pages pour noter seulement tous les actes de courage et de dévouement, tous les services rendus par ses élèves à la défense nationale. Les promotions à venir en garderont pieusement le souvenir, et l'exemple des aînés aidera les plus jeunes dans l'accomplissement de leur tâche, que nous prévoyons rude et laborieuse.

» Conformément aux traditions de notre Société, je dois maintenant vous donner quelques détails sur le fonctionnement pendant l'année 1918 du Laboratoire central et de l'École supérieure d'Électricité.

I. — Laboratoire central.

» 1^o *Personnel*. — Le personnel du Laboratoire a compté au maximum cinq personnes pendant l'année 1918. Le nombre des essais effectués est sensiblement maintenu au niveau de l'année précédente, et ce n'est qu'au prix de grandes difficultés que l'activité du Laboratoire a pu être maintenue.

» 2^o *Essais*. — Le nombre des essais a été de 876 contre 913 en 1917. Ils se répartissent comme suit :

	1918.	1917.
Lampes à incandescence.....	346	309
Compteurs (1).....	209	323
Ampèremètres.....	74	51
Haute tension.....	52	32
Machines.....	35	13
Voltmètres.....	33	38
Piles.....	28	48
Wattmètres.....	17	7
Fers tôles.....	16	15
Résistivités, résistances.....	14	11
Accumulateurs.....	10	29
Lampes à incandescence. Essais au choc....	4	4
Paratonnerres.....	3	4
Oscillogrammes.....	1	3
Ondemètres.....	"	1
Essais de précision.....	2	1
Divers.....	32	14
	876	903

» Les recettes pour essais se sont élevées à 54 183 fr en 1918, contre 46 836 fr en 1917. Comme l'année précédente le produit moyen par essai a notablement augmenté par rapport à l'année précédente.

» Les essais se rapportant directement ou indirectement à la défense nationale ont été nombreux. Nous citerons en particulier, pour le Ministère de la Guerre, des essais de projecteurs de campagne, de détonateurs pour mines, de lampes à incandescence. Pour les services de l'aéronautique et de la télégraphie militaire,

(1) Octroi : 167; Chambre des Députés : 22; divers : 20; total : 209.

des essais de sorties d'antennes de T. S. F., d'appareils de mesure, de diélectriques et de perméabilité; pour le service de l'armement, des essais magnétiques et de rigidité diélectrique de différents échantillons d'huile.

» La Marine nationale, outre les essais ordinaires d'accumulateurs, nous a confié l'étude d'éléments témoins, ainsi que celle d'éléments réduits au sujet de la production d'hydrogène arsenié. D'importants essais de lampes et de rigidité diélectrique ont également été entrepris pour ce département.

» Le Ministère des Colonies continue à faire contrôler par nos services les piles qui doivent être expédiées dans nos possessions d'outre-mer. Le Ministère des Inventions nous a confié des essais d'accumulateurs et d'appareils divers.

» Enfin le Signal Corps américain a fait vérifier au Laboratoire une série d'appareils de mesure destinés aux travaux de campagne.

» Les constructeurs travaillant pour les services publics nous ont confié un certain nombre d'essais, sans doute comme conséquence des conditions imposées par les cahiers des charges. C'est ainsi que nous avons été amenés à étudier de très importantes séries de transformateurs d'amplificateurs, un certain nombre d'appareils de mesure, et à essayer des câbles d'antennes dans des conditions variées.

» Les essais faits pour les particuliers offrent une assez grande variété et révèlent souvent des besoins spéciaux.

» Des essais de matières isolantes nouvelles sont venus accuser la pénurie des matières isolantes usuelles, et en particulier de la fibre. Les essais de percement de câbles ont été également nombreux, ainsi que les essais d'huile de transformateurs.

» Le service des essais de machine, outre les essais complets de l'usine de la Chambre des députés en vue du renouvellement du contrat d'éclairage, a procédé aux essais de réception d'une station centrale et aux essais de rendement d'une sous-station. Il a également contrôlé la réception d'une installation complète de château.

» Les essais de compteurs accusent pour l'année 1918 une notable diminution du nombre des compteurs d'octroi vérifiés par nos soins. Cette diminution tient surtout à l'augmentation notable du prix du charbon, qui laisse un écart de plus en plus faible entre les prix de production du courant dans une usine particulière et les prix de vente de la C.P.D.E.

» Les essais de compteurs haute tension (jusqu'à 12 000 volts) et de gros calibre continuent à être demandés assez fréquemment. Les sommes d'argent souvent considérables (de l'ordre de 10⁵ frs

ou même plus) par lesquelles se traduisent les litiges et que les différences ou même les défauts constatés à la suite de ces essais permettent de préciser, montrent assez l'intérêt de semblables mesures. La très remarquable Communication de notre chef de travaux, M. A. Durand, sur l'« Influence des variations journalières de la fréquence sur les indications des compteurs d'induction », et les conclusions de ce travail, ont déjà attiré l'attention de la Société sur l'importance et la complexité des questions qui se rattachent à la vérification des compteurs de gros calibres.

» Indépendamment des essais de compteurs, mais dans le même ordre d'idées, le Laboratoire a eu à étalonner en courants polyphasés, alternatif et continu, des wattmètres de divers calibres.

» Les services de la Photométrie ont eu, indépendamment des essais courants, à déterminer l'intensité moyenne sphérique d'un certain nombre de lampes à incandescence. Nous enregistrons spécialement ce fait qui montre que la notion d'intensité moyenne sphérique commence à occuper dans la pratique industrielle la place importante que la théorie lui assigne depuis longtemps, et que rend indispensable la nouvelle forme de filament des lampes dites *de mi-watt*. Notre Président sortant, M. Larnaude, a bien voulu faire un don important au Laboratoire pour encourager ces études.

» Les montages et installations nécessaires pour les déterminations de l'intensité moyenne sphérique sont à l'heure actuelle réalisés de façon stable au Laboratoire.

» D'autre part, les lampes à incandescence de fortes intensités font l'objet de demandes assez nombreuses. Nous avons, dans le courant de l'année, essayé plusieurs foyers de 3000 et 2000 bougies.

» Signalons également une mesure comparative d'éclairage d'écran de cinéma en courant alternatif et en courant redressé, précédée de l'étude du commutateur tournant synchrone redresseur de courant.

» Le nombre des essais haute tension accuse une notable augmentation par rapport au chiffre de l'année précédente. Nous signalerons parmi ces essais la mesure de la tension aux bornes d'une ampoule à rayons X alimentée par un transformateur.

» Parmi les essais divers, nous relevons l'essai d'une dynamo destinée à l'éclairage des automobiles et au démarrage de leur moteur, des essais comparatifs de douilles à montage spécial, des essais comparatifs d'aimants, enfin la continuation, à l'aide de la méthode d'enregistrement des volts-heures par un compteur O. K.,

des mesures des chutes linéaires de tension de courants de retour d'un important réseau de traction.

» Des mesures de précision ont été faites sur une résistance et un élément Weston. Nous rappelons à ce sujet que le Laboratoire central reste toujours dépositaire des ohms étalons construits et étudiés par M. Benoît; lors des bombardements de 1918, des mesures de protection spéciale ont dû être prises pour la conservation de ces précieux étalons.

» Enfin, depuis avril 1917, trois salles du Laboratoire ont été mises à la disposition de la Section technique de l'Aéronautique, qui les utilise pour des essais et réceptions de machines et d'équipements de T. S. F., des relevés oscillographiques, des essais d'accumulateurs, etc.

» 3^o *Souscription*. — Comme les années précédentes, les généreux donateurs qui accordent au Laboratoire leur précieux appui nous ont apporté leurs souscriptions qui se sont montées à 17 500 fr contre 16 650 fr en 1917 : Plus que jamais, dans les circonstances actuelles, cette aide nous est nécessaire, et nous exprimons ici à ceux qui nous l'assurent l'expression de notre plus vive gratitude.

II. — École supérieure d'Électricité.

» 1^o *Enseignement*. — L'un de nos conférenciers de la première heure, M. de la Touane, qui dès 1894 apportait son précieux concours à l'École pour l'enseignement de la Téléphonie, nous a exprimé le désir de prendre un repos bien mérité. Cette décision ayant été maintenue malgré nos insistances, nous avons été heureux de proposer à votre Comité, qui l'a prononcée à l'unanimité, la nomination de M. de la Touane comme conférencier honoraire. La Commission administrative a confié sa succession à M. Viard, ingénieur des Télégraphes, diplômé de l'École supérieure d'Électricité, que nous avons été heureux de voir revenir parmi nous. Cette désignation, suivant la règle adoptée par la Commission, a été faite pour une période de 5 ans.

» 2^o *Concours d'entrée*. — De même que l'année précédente, un concours spécial a eu lieu au mois de mars 1918 pour les jeunes gens de la classe 1919 reconnus bons pour le service. Les mêmes dispositions que les années précédentes, concernant le bénéfice de l'admissibilité, leur seront appliquées.

» 3^o *Promotion XXIV* (1917-1918). — Il a été délivré, à la fin de juillet 1918, 26 diplômes se répartissant ainsi :

Ingénieur des Arts et Manufactures	1
Élèves de l'École supérieure des Postes et Télégraphes	3
Élèves étrangers diplômés d'Écoles techniques supérieures	6
Licenciés ès sciences	6
Ingénieur diplômé des Écoles des Arts et Métiers	1
Élèves reçus au concours et divers	9
	26

» 3^o *Promotion XXV* (1918-1919). — La promotion actuellement en cours d'études comprend 49 élèves. En voici sa composition :

Licencié ès sciences	8
Élèves ingénieurs des Postes et Télégraphes	3
Ingénieur de l'École des Mines de Saint-Étienne	1
Ingénieur des Écoles nationales d'Art et Métiers	1
Ingénieur agronome	1
Officiers délégués par le Ministère de la Guerre	4
Élèves reçus au concours (sur 50 candidats)	24
	49

» La promotion comprend deux élèves femmes de nationalité française (Décision du Conseil de Perfectionnement de l'École, par date du 10 octobre 1917).

» 4^o *Anciens élèves*. — Le nombre total d'anciens élèves ayant passé par l'École (non compris la promotion actuelle) est de 1757, sur lesquels 1489 ont obtenu le diplôme. Ces derniers se décomposent ainsi :

Officiers et ingénieurs de l'État	183
Ingénieurs des Écoles nationales d'Arts et Métiers	206
Licenciés ès sciences	203
Ingénieurs des Arts et Manufactures	137
Anciens élèves de l'École Polytechnique	132
Élèves étrangers	124
Ingénieurs civils des Mines, etc.	25
Anciens élèves de l'École Centrale Lyonnaise, etc.	11
Élèves reçus au concours et divers	468
	1489

» 5^o *Société amicale des Ingénieurs sortis de l'École supérieure d'Electricité*. — Nous nous bornerons à noter ici quelques dons

généreux qui ont été faits à la Société amicale de nos anciens élèves, soit directement, soit par l'intermédiaire de la Société.

» En premier lieu, à la suite d'une démarche spéciale que j'avais faite auprès de lui, notre collègue M. Eiffel qui, depuis de longues années, a donné tant de preuves d'intérêt à l'École, a bien voulu faire à la Société amicale un don de 1000 fr spécialement destiné à sa caisse de crédit d'études. Je tiens ici, en appelant encore une fois l'attention de nos collègues sur cette institution si utile et encore si peu riche, à exprimer à M. Eiffel ma plus vive gratitude.

» D'autre part, l'un de nos anciens élèves, de nationalité chilienne, M. Barros (Fernandez), a fait don à la Société française des Électriciens, qui l'a attribué à la Société amicale, d'une somme de 500 fr destinée à secourir des infortunes causées par la guerre.

» Tels sont, Messieurs, les principaux événements qui ont marqué pendant l'année 1918 l'activité du Laboratoire et de l'École. Ce Rapport est encore un Rapport d'attente, attente de développements futurs de nos deux institutions qui se font de jour en jour plus indispensables, aussi bien du côté du Laboratoire que du côté de l'École. De grands devoirs s'annoncent pour nous; nous devons avoir les moyens de les remplir d'une manière digne de la Société qui les a créés; tous nos efforts sont tendus vers ce but; nous avons le ferme espoir qu'avec l'aide concordant de tous les membres de notre Société et de tous ceux qui s'intéressent à l'avenir de l'Industrie électrique en France, nous arriverons, dans un délai que nous voudrions rapproché, au jour auquel nous aspirons, celui où nous pourrions transporter dans des locaux spéciaux et bien aménagés des services qui étouffent et souffrent dans les bâtiments actuels de la rue de Staël. »

Mis aux voix, ce Rapport est approuvé à l'unanimité.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

**NOUVELLES INSTALLATIONS DANS LES GRANDES CENTRALES AMÉRICAINES RÉALISÉES
OU PROJETÉES DEPUIS TROIS ANS ET QUELQUES INDICATIONS SUR LES APPLICATIONS
ÉLECTRIQUES A L'ORDRE DU JOUR.**

M. K. SOSNOWSKI. — « Messieurs, Ayant, à l'occasion de mes diverses missions, visité les États-Unis d'Amérique à deux reprises, et à dix ans d'intervalle, j'ai eu l'avantage de vous rendre compte, il y a quelque temps, de mes constatations, tant au point de vue des choses réalisées qu'à celui des nouvelles tendances manifestées dans le domaine des applications électromécaniques.

» Je vous demande la permission aujourd'hui, ayant suivi la question de très près, quoique, cette fois-ci seulement à distance, de vous mettre au courant de quelques nouvelles installations dans les grandes centrales américaines, faites ou projetées, durant les trois dernières années.

» Les progrès ont été, en réalité, beaucoup moins importants qu'ils ne s'annonçaient, il y a trois ans, les nécessités de la guerre ayant absorbé presque totalement l'activité de ce pays.

» Beaucoup de projets dont j'avais entendu parler lors de mon dernier voyage aux États-Unis, en 1915, et qui devaient être réalisés à bref délai, se sont trouvés ajournés de ce fait.

» Il n'en est pas moins vrai qu'il y a toujours, dans un pays à marche ultra-rapide comme celui des États-Unis, des choses nouvelles qui méritent d'être signalées et d'attirer votre attention.

» Tout en me bornant, pour l'instant, à consigner les faits nouveaux constatés dans le développement des stations centrales d'électricité et, principalement, ceux relatifs aux groupes à turbine à vapeur, je vous dirai quelques mots sur certaines autres applications de ces dernières, ne serait-ce que pour vous donner l'idée des vastes conceptions et des réalisations immédiates qui sont au nombre de caractéristiques de ce pays.

» Je vous donnerai, également, des *indications sommaires* sur diverses questions à l'ordre du jour, telles que : transports à très haute tension et à grande distance, traction électrique des chemins de fer, téléphonie à grande distance, télégraphie et téléphonie sans fil, stations en plein air et automatiques, etc.

STATIONS CENTRALES.

DESCRIPTION.

» Dans la Communication d'il y a trois ans, j'avais décrit les installations des principales stations centrales de New-York, Chicago, Philadelphie et Detroit.

» Je vous donnerai, dans le même ordre, la description des nouvelles installations réalisées ou projetées depuis dans ces stations, ainsi que les détails de quelques nouvelles *centrales thermiques et hydroélectriques*.

Ville de New-York.

» 1. NEW-YORK EDISON C^o. — La Compagnie Edison, qui possède deux grandes stations, Waterside n^o 1 et n^o 2, procède actuellement aux agrandissements ci-après :

» *Station Waterside, n^o 1.* — Installation de deux groupes de 35 000 kw.

» De même que les groupes précédemment installés à la station n^o 2, les nouveaux groupes fourniront du courant triphasé, 25 périodes, 6600 volts. Ils tourneront à la vitesse de 1500 t : min et pourront développer, d'une manière continue, 35 000 kv-A, à facteur de puissance de 100 pour 100.

» Le poids net d'un des groupes, non compris celui du condenseur et des auxiliaires, s'élève approximativement à 340 tonnes.

» La turbine est étudiée pour fonctionner au même régime que les turbines déjà en service à la station de Waterside n^o 2 ; mais on s'est réservé le moyen, en la transformant un peu, de porter la *pression* de fonctionnement de 14 à 19,2 kg : cm², et le degré de *surchauffe* de 49° C. à 135° C.

» Avec un vide au condenseur atteignant 73,7 cm, une surchauffe de vapeur de 46° C. et une pression de 14 kg : cm² à la turbine, les *garanties de consommation* pour ces groupes s'élèvent, à différentes charges, aux valeurs suivantes :

kw		kg
15 000	12	lbs : kw-h = 5,44
19 000	11,6	» 5,26
25 000	11,5	» 5,22
35 000	11,8	» 5,35

» Chaque unité exige un volume d'eau de circulation de 280 000 litres par minute.

» Le condenseur a une surface réfrigérante d'environ 4500 m². Il est boulonné directement à la turbine, mais suspendu élastiquement au moyen de ressorts. Le corps du condenseur est établi de manière à ne plus nécessiter l'emploi des poutres flexibles employées avec les condenseurs de même surface déjà en service dans la station Waterside n^o 2.

» Au lieu de deux pompes de circulation, le nouveau condenseur n'en a qu'une et, comme le précédent, il est muni de deux pompes d'extraction commandées par turbine à vapeur, et de deux pompes à air. Toutefois, la New-York Edison C^o envisage le remplacement d'une des pompes à air de chaque groupe par une pompe à air à éjecteur, selon les résultats des essais qu'elle fait subir à ce type de pompe.

» A puissance plus forte (35 000 kw au lieu de 30 000 kw précédemment installés), ces groupes sont moins encombrants :

$$15,5 \times 6,5 \times 3,5 \text{ m (haut)}$$

et plus économiques comme consommation.

» 2. INTERBOROUGH RAPID TRANSIT C^o. — *Seventy Fourth Street Station*. — Les premiers groupes de 30 000 kw installés par cette Compagnie étaient du type Compound jumelés. La détente s'opérait dans deux éléments séparés entraînant deux génératrices séparées, la turbine à haute et basse pression travaillant à vitesses différentes.

» Nous disions, il y a trois ans, que des groupes de 60 000 kw étaient à l'étude.

» Depuis ce temps, l'Interborough Rapid Transit C^o a effectivement commandé à la Westinghouse un groupe de cette importance pouvant fournir, *en surcharge* pendant 2 heures, une puissance de 70 000 kw avec $\cos \varphi = 1$ (*fig. 1 à 5*).

» Ce groupe, qui a été mis en marche dernièrement, consiste en une turbine à haute pression et deux à basse pression, chaque élément étant accouplé directement à sa propre génératrice, tous les trois étant reliés ensemble électriquement.

» La vapeur passe entièrement par l'élément à haute pression, après quoi elle se divise en deux courants passant par les deux éléments à basse pression.

» Cette division en trois éléments présente, d'après les constructeurs, de nombreux avantages : les grosses pièces sont plus petites, moins lourdes, plus faciles à exécuter et à manier; les différences de température dans chaque cylindre sont relativement moindres;

l'ensemble est beaucoup plus élastique que dans le cas d'une seule grosse unité.

» Bien que ce groupe soit à trois éléments séparés, le mode de démarrage des turbines avant sa synchronisation est essentiellement le même que dans le cas d'un groupe à un seul arbre.

» Par un ingénieux système de réglage, chaque élément peut être, en marche, isolé des autres. Par exemple, si la turbine à haute pression doit être mise hors de service, chaque turbine à basse

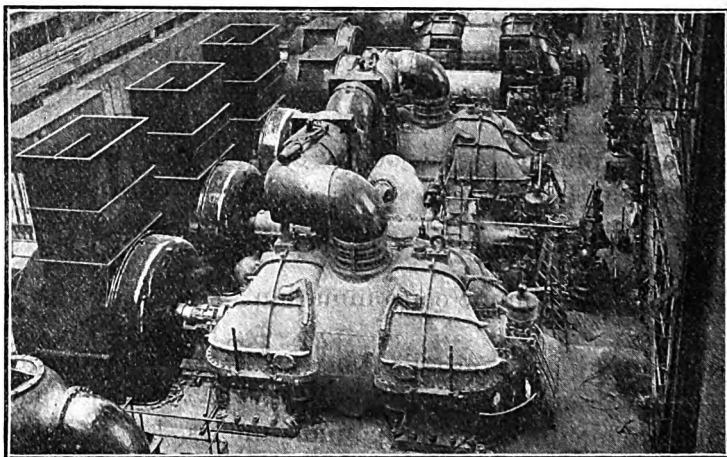


Fig. 1. — Turbo-alternateur triple, Westinghouse de 60000 kw. installé à la Seventy-fourth Street Station, par l'Interborough Rapid Transit Co de New-York.

pression va recevoir automatiquement la vapeur à haute pression directement des chaudières, à travers son système spécial à haute pression, tandis que, en marche normale, elles ne reçoivent pas de vapeur à haute pression. Par contre, si les deux turbines à basse pression doivent être mises hors service pour une raison quelconque, indépendante de la turbine à haute pression, cette dernière continuera à travailler en échappant automatiquement à l'air libre; mais, aussitôt qu'une turbine à basse pression peut se remettre en marche, la turbine à haute pression va échapper dans cet élément. Toutes ces combinaisons sont entièrement automatiques et restent soumises au contrôle de l'opérateur au tableau. Une pareille élasticité est impossible avec des groupes équivalents à un seul élément.

» La charge de 60000 kw est partagée également entre trois éléments, alors qu'un seul élément à basse pression, travaillant avec de la vapeur à haute pression, peut développer une charge de 30 000 kw pendant une demi-heure, de même que l'élément à

haute pression, en jonction avec un élément à basse pression, peut développer continuellement 40 000 kw.

» On peut se faire une idée de la puissance du groupe par cette

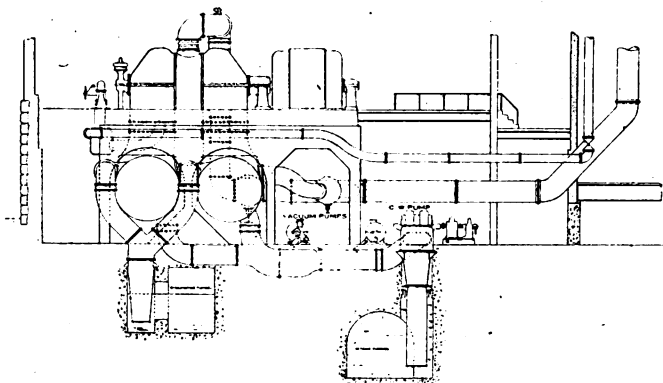


Fig. 2. — Turbo-alternateur de 60 000 kw., en élévation longitudinale.

simple indication qu'il occupe une surface de 14 m $\times$ 15 m, qu'il lui faut 340 000 kg de vapeur à l'heure pour faire sa pleine charge

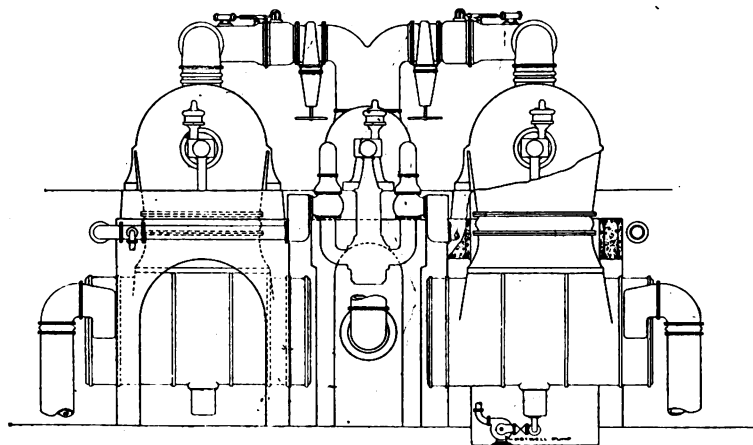


Fig. 3. — Turbo-alternateur de 60 000 kw., en élévation transversale.

et une tuyauterie d'amenée de vapeur de 450 mm de diamètre.

» Au point de vue de l'écoulement de la vapeur, l'élément à haute pression est à flux unique. L'élément à basse pression est à flux semi-double. La vapeur entre au milieu du cylindre et se dirige, à travers une portion d'aubages, dans la même direction. Ensuite elle se divise et une moitié continue dans la même direction jusqu'au

condenseur, alors que l'autre moitié se dirige, dans une direction opposée, à travers un passage entourant les étages à flux simple, et, de là, à travers l'aubage à basse pression, jusqu'au condenseur.

» L'élément à haute pression contient 50 rangées d'aubes, la hauteur de la première étant 100 mm et de la dernière 225 mm.

» Pour supporter le poids du rotor, il faut des paliers de 250 mm de diamètre, ce qui correspond à une vitesse de 20 m par seconde.

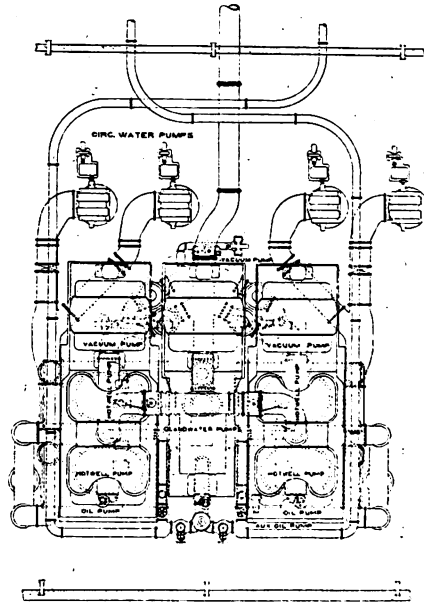


Fig. 4. — Turbo-alternateur de 60000 kw. en plan.

» Le rotor est équipé avec des coussinets Kingsbury pour parer au déplacement latéral de l'arbre.

» Étant donnée la haute température de la vapeur à l'arrivée, le cylindre de la turbine à haute pression est fait en acier coulé.

» Le tuyau amenant la vapeur d'échappement de la turbine haute pression à la turbine basse pression a 1 m de diamètre.

» Chaque élément à basse pression contient 44 rangées d'aubes. La hauteur de la première est de 150 mm et celle de la dernière 375 mm.

» Dans cet élément le diamètre des paliers est 300 mm, le rotor étant plus lourd.

» La vitesse est de 23,5 m par seconde.

» Étant donné la possibilité, pour cette turbine, de travailler accidentellement avec de la vapeur à haute pression et, par con-

séquent, à haute température, la partie centrale du cylindre est faite en acier coulé.

» Pour assurer un bon vide, on a recours à quatre condenseurs, deux pour chaque turbine à basse pression.

» La surface réfrigérante est de 9000 m².

» Le groupe est établi pour fonctionner avec de la vapeur à 15 kg par centimètre carré, à 282° C. et vide de 96 pour 100.

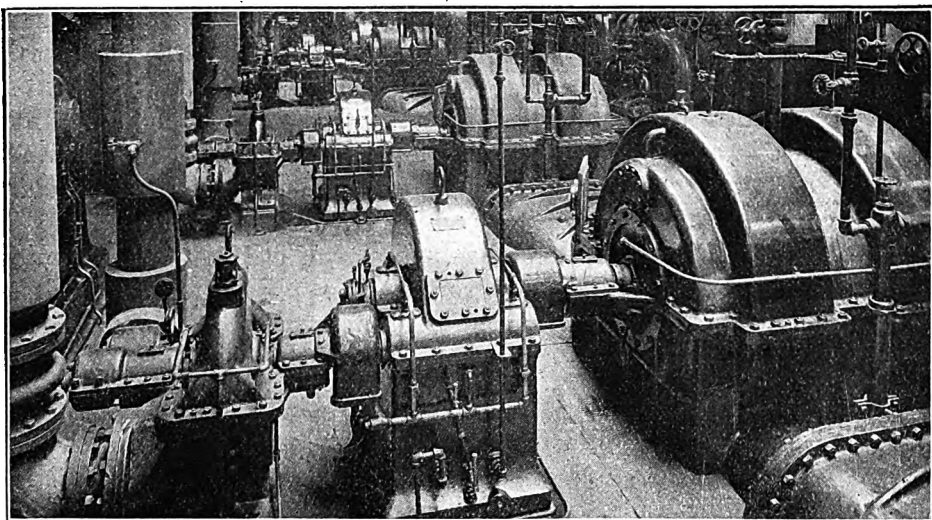


Fig. 5. — Groupes de pompes d'alimentation des condenseurs du turbo-alternateur de 60000 kw de New-York.

» A la charge de 40 000 kw qui est la plus économique, la pression d'échappement de la turbine haute pression à la turbine basse pression est de 2 kg par centimètre carré, et la température 120° C.; dans cette dernière, la vapeur se détend à la pression du condenseur, c'est-à-dire 25 mm de mercure et la température 26° C.

» Le courant fourni par le groupe est triphasé à 25 périodes et à 11 000 volts.

» La consommation de ce groupe est de 10,5 lbs par kilowatt-heure, soit 4,76 kg.

» Le prix consenti par l'Interborough Rapid Transit Co à la Brooklyn Rapid Transit Co, pour l'énergie à fournir à l'exploitation de son réseau souterrain de Manhattan, est le plus bas de ceux qui étaient proposés par les fournisseurs en mesure de prendre part à l'adjudication.

» Nulle part une Compagnie de Tramways ne paie aussi bon marché une énergie électrique provenant d'une usine à vapeur.

» C'est sur la base de 0,7 « cent » (soit 3 cs,5 au pair) qu'est vendu le kilowatt-heure à courant *alternatif* triphasé à 11 000 volts, et sur la base de 0,825 « cent » le kilowatt-heure à courant *continu*, sous certaines conditions de charge, de consommation annuelle et de prix de charbon (la base étant 3 doll. 23 par livre de charbon sec, soit 36 francs par tonne).

» Les tramways de Chicago avaient déjà obtenu le prix minima de 0,9 « cent », soit 4,5 cm le kilowatt-heure, mais même une aussi faible différence, c'est-à-dire $\frac{1}{1000}$ de dollar en moins par kilowatt-heure, se chiffre par une économie de 100 000 dollars par an, étant donné que la consommation annuelle de la Brooklyn Rapid Transit C^o atteindra 100 millions de kilowatts-heure dans un délai assez court.

» La seule explication de ce bas prix paraît être dans l'économie qu'on attend de l'emploi de groupes très puissants, construits, installés et exploités avec tous les raffinements de la pratique la plus moderne.

» 3. UNITED ELECTRIC LIGHT AND POWER C^o. — 201 th *Street Station*. — On y installe un quatrième groupe de 20 000 kw, à 1500 tours, ce qui porte la capacité à 80 000 kw sur 160 000 *prévue* comme capacité totale.

» La consommation est de :

Pleine charge.....	kg 5,72
Demi-charge	5,46
Quart de charge	6,5

» Les condenseurs sont établis pour fournir un vide allant jusqu'à 74 cm avec de l'eau à 17° C. (159 000 litres).

» Il y a 32 chaudières Babcock de 10 000 kg de vapeur à l'heure, munies d'appareils Taylor.

» Basé sur la capacité actuelle de 80 000 kg, le *prix par kilowatt* est de 315 Fcs, se divisant comme suit :

Bâtiment.....	fr 130
Chaudière	70
Groupe électrogènes.....	65
Divers	50

Ville de Philadelphie.

» PHILADELPHIE ELECTRIC C^o. — Cette Compagnie qui était la première à installer, il y a 4 ans, dans sa station centrale A-2

spécialement construite à cet effet dans la 28^e rue, à Philadelphie, des groupes de 35 000 kw, a établi une nouvelle *centrale à Chester*, à 20 km de Philadelphie, où elle installe plusieurs groupes de 30 000 kw dont deux sont déjà en fonctionnement.

Ville de Chicago.

» COMMONWEALTH EDISON CO. — Durant les trois dernières années, cette Compagnie, sous la haute direction de Samuel Insull, a fait les nouvelles installations ci-après :

» *Fisk Street Station.* — Cette station procède à l'installation de deux nouveaux groupes; l'un de 30 000 kw, 60 périodes, de la General Electric, et l'autre de 35 000 kw, 25 périodes, de la Westinghouse.

» La *capacité totale* de cette station se trouve ainsi portée à 240 000 kw en 16 groupes : 10 de 12 000 kw verticaux de la General Electric, 1 de 25 000 kw horizontal Parsons, 1 de 20 000 kw et 1 de 30 000 kw horizontal de la General Electric, 1 de 35 000 kw de Westinghouse.

» *North West Station.* — Aux deux unités verticales de 20 000 kw que comportait primitivement cette station, on a ajouté un groupe horizontal compound d'une puissance de 30 000 kw qui, depuis sa mise en service fin 1915, a souvent développé 35 000 kw, pendant un temps prolongé, sans dépasser un échauffement modéré.

» On a porté plus récemment le nombre des groupes à 6 unités, représentant une *puissance totale* de 165 000 kw.

» Le groupe installé en 1915 comporte un alternateur de 30 000 kw, 25 périodes, à 9000 volts, accouplé directement à une turbine horizontale compound dont la haute pression et la basse pression sont montées en tandem sur le même arbre (*fig. 6*) avec enveloppes séparées pour les deux parties et double flux de vapeur pour la basse pression.

» La turbine à haute pression est à 10 étages.

» La turbine à basse pression est à 4 étages disposés deux à deux, symétriquement, de chaque côté de l'admission centrale de vapeur.

» La pression de vapeur à l'admission dans la turbine est d'environ 16 kg et le degré de surchauffe de 111° C.

» A la suite de la vanne de vapeur, qui met en communication le collecteur d'alimentation de la turbine avec sa chambre de vapeur à haute pression, il y a dans celle-ci 14 *souppapes d'admission*

qui, sous la commande du régulateur, fournissent de la vapeur au premier étage de pression de la turbine.

» De plus *quatre soupapes de surcharge* sont disposées sur la turbine, de manière que chacune s'ouvre à son tour, en même temps que fonctionnent respectivement les quatre dernières soupapes d'admission de vapeur. Leur rôle est de faire passer une

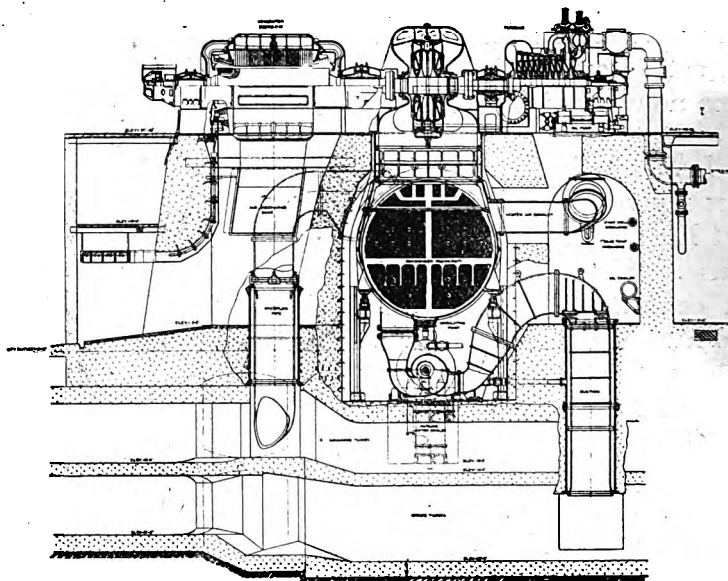


Fig. 6. — Turbo-alternateur de 30000 kw installé à la North-West Station à Chicago, par la Commonwealth Edison C^o.

certaine quantité de vapeur du premier dans le quatrième étage, à travers des tuyères appropriées.

» La vapeur, à sa sortie de l'enveloppe à haute pression, sous une pression que la détente a réduite à moins de 0,5 kg au-dessous de la pression atmosphérique, pénètre dans l'enveloppe à basse pression, en son milieu, et s'y divise en deux courants qui s'écoulent, en directions opposées, et qui, après avoir passé par les deux étages de cette enveloppe, en sont évacués par une double tuyauterie allant au condenseur.

» L'*arbre* du groupe est en trois parties, dont l'une porte le rotor de la turbine à haute pression, la seconde le rotor à basse pression et la troisième le rotor de l'alternateur et l'induit de son excitatrice.

» Le plus gros diamètre de l'arbre atteint un peu plus de 60 cm.

» Il tourne dans quatre paliers avec circulation d'eau de refroidissement.

dissement sous 3,5 kg de pression et circulation d'huile de graissage sous une pression de 1,4 kg environ.

» En marche normale, l'huile est maintenue en circulation par la pompe, calée directement sur l'arbre; avant mise en marche, une pompe auxiliaire à vapeur établit la circulation de l'huile, et la maintient jusqu'à ce que sa mise hors service se fasse automatiquement, sous l'action d'un régulateur, quand la vitesse de régime est atteinte.

» Le condenseur, qui est du type à surface, est d'une capacité normale de 162 000 kg de vapeur à l'heure, et d'une capacité maximum de 180 000 kg.

» En passant de la turbine dans le condenseur, la vapeur est d'abord utilisée au réchauffage préliminaire de l'eau d'alimentation, résultat qu'on a obtenu en faisant précéder la section du condenseur affectée à la condensation proprement dite d'une section dans les tubes de laquelle passe l'eau d'alimentation, avant de se rendre aux économiseurs qui surmontent les chaudières.

» Ce préchauffage permet de porter la température de l'eau jusqu'à plus de 30° C., et, en passant ensuite dans les économiseurs, cette eau prend une température dépassant 130° C. avant d'être envoyée aux chaudières.

» Les données des *chaudières* et des *économiseurs* sont indiquées ci-dessous.

» L'installation est caractérisée en outre par la *disposition* très étudiée des *auxiliaires* de turbine et de condenseur, disposition représentée schématiquement sur la figure 7.

» Pour alimenter le condenseur en eau de circulation, soit 12 480 000 litres à l'heure, on fait appel à une *pompe à double aspiration* de plus de 1,20 m de diamètre, à trois rotors, *commandée par une turbine de 650 chevaux à 1500 tours*.

» Sur l'arbre même de cette pompe est montée la pompe mixte qui évacue l'air et l'eau du condenseur par un même et unique orifice. Une fois dans la pompe, l'air et l'eau en mélange se séparent, l'air étant évacué par un élément de pompe spécial et l'eau passant par un autre pour subir dans le condenseur le réchauffage qui doit précéder, ainsi que cela a été déjà exposé, son envoi dans les économiseurs, et de là dans les chaudières.

» A ce « préchauffage » est également utilisée la vapeur d'échappement des appareils auxiliaires, ce qui fait que l'utilisation des turbines sans condensation pour les appareils auxiliaires est favorable à l'économie d'ensemble de l'exploitation.

» L'eau de condensation est recueillie dans une bêche, où est

envoyée aussi l'eau filtré qui doit compenser les fuites, et, de là, deux *pompes d'alimentation*, commandées elles aussi par turbines, envoient cette eau aux économiseurs. Ce sont des pompes à trois étages, tournant à la vitesse de 2500 tours, et d'un débit horaire supérieur à 200 000 litres sous une pression de 22,75 kg : cm².

» L'alimentation du groupe est assurée par une batterie de cinq chaudières tubulaires, à réservoir de vapeur transversal et double foyer mécanique à grille B et W, offrant une surface de

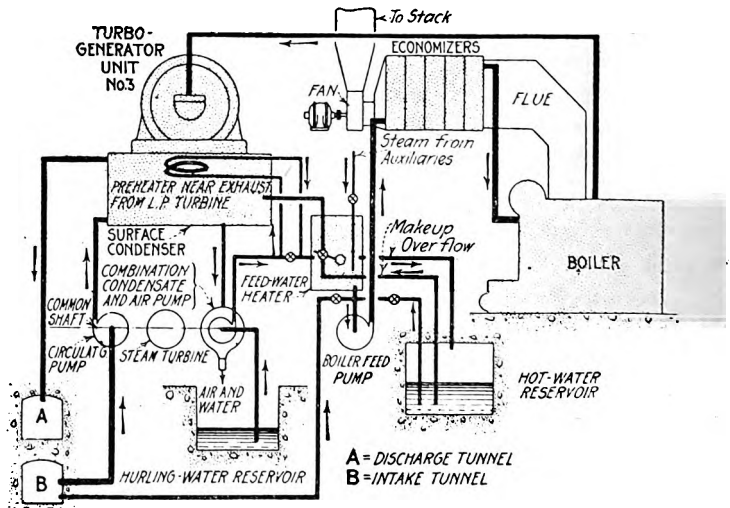


Fig. 7. — Vue schématique de la tuyauterie de vapeur et d'eau.

vaporisation totale de 5490 m², suffisante pour alimenter la turbine au régime de 35 000 kw.

» Les foyers représentent une surface de chauffe qui s'élève au total à 123 m², c'est-à-dire au $\frac{1}{13}$ environ de la surface totale d'évaporation.

» Pour une surface de chauffe de 1000 m² :

» La chaufferie comporte une surface de grille de 22,3 m², une section de cheminée de 4,17 m², et les économiseurs une surface correspondante de 538,2 m².

» Si l'on considère maintenant les trois unités installées plus récemment dans la North-West Station, on peut les rattacher à deux types différents, que distinguent, d'une part le système de turbine adopté, d'autre part la fréquence du courant produit.

» Deux des nouveaux groupes sont identiques, et composés chacun d'une turbine compound à réaction, accouplée à un alter-

nateur triphasé, 60 périodes, pouvant débiter 30 000 kw à facteur de puissance 85 pour 100.

» Le dernier groupe est à 25 périodes, comme les trois premiers, mais l'alternateur triphasé de 35 000 kw à facteur de puissance unité qu'il comporte est accouplé à une turbine à action, à enveloppe unique.

» *Groupes compound à réaction de 30 000 kw (fig. 8).* — Les deux éléments de la turbine compound sont disposés en tandem; entraî-

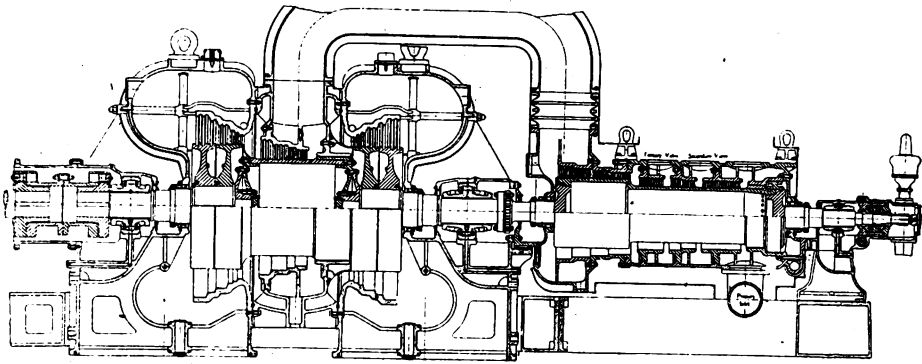


Fig. 8. — Coupe transversale de la turbine du groupe de 35 000 kw de la Westinghouse Co installé à North West Station à Chicago.

nant un arbre unique sur lequel est monté, à la suite des deux rotors de haute et basse tension, le rotor d'un alternateur unique, contrairement aux dispositions du type cross-compound dans lequel les rotors de turbine correspondent à des alternateurs séparés.

» Sur le même arbre est également monté, à la suite du rotor de l'alternateur, l'induit d'une petite excitatrice.

» Cet arbre tourne dans 6 paliers à circulation d'huile, dont 3 correspondent à la turbine, 2 à l'alternateur, 1 à l'excitatrice.

» L'huile qui lubrifie ces paliers est refroidie par une circulation d'eau empruntée au circuit de refroidissement du condenseur.

» La turbine à haute pression, qui est du type à réaction et à flux unique, compte 90 couronnes d'aubes fixes et mobiles. La vapeur, qui y passe sous le contrôle du régulateur et du mécanisme de soupapes, s'y détend, de la pression d'admission de 16,1 à la pression de 2,38 kg environ, dans les conditions de la charge la plus économique.

» A la sortie de la turbine à haute pression, par la partie supérieure, la vapeur passe au centre de l'enveloppe de la turbine à basse pression, qui présente à la fois les caractéristiques des turbines à simple et à double flux.

» Tout d'abord, en effet, elle traverse en flux unique 20 couronnes d'aubes fixes et mobiles, dans lesquelles elle se détend de la pression d'admission de 2,38 kg à celle de 0,6.

» Elle passe ensuite, en flux double, dans 16 étages de la turbine qui ont chacun leur conduite d'échappement au condenseur.

» Les vitesses périphériques des disques sont maintenues très faibles, la moyenne ne dépassant pas 155 m : sec.

» De chaque côté de l'arbre creux portant les aubes à moyenne pression sont montés, sur l'arbre du groupe, les moyeux des deux disques portant les aubes à basse pression.

» Le stator à basse pression correspondant, entièrement en fonte, est composé de même de trois sections assemblées entre elles, chaque section divisée en deux parties suivant le plan diamétral horizontal, mais les trois parties supérieures ainsi définies étant assemblées et formant un couvercle qui peut s'enlever d'une seule pièce.

» Dans la turbine à haute pression, l'aube la plus courte a une longueur de 101,6 mm.

» Dans la turbine à basse pression, l'aube la plus courte a une longueur de 190,5 mm.

» Dans la turbine à haute pression, l'aube la plus longue a une longueur de 152,4 mm.

» Dans la turbine à basse pression, l'aube la plus longue a une longueur de 447 mm.

» L'admission de vapeur est réglée par une soupape principale et deux soupapes de surcharge; la première établie pour correspondre à une puissance maximum de 25 000 kw, la seconde établie pour une puissance de 30 000 kw, la troisième établie pour une puissance de 35 000 kw.

» La turbine est desservie par deux condenseurs distincts, dans lesquels arrive séparément la vapeur de deux conduites d'échappement de l'élément à basse pression du groupe.

» Avec le même nombre de tubes identiquement disposés dans les deux corps de condenseur (soit 12 972 tubes de 25,4 mm de diamètre et de près de 5 m de longueur), le condenseur réalise une surface totale de 5050 m² environ, soit environ 0,17 m² de surface par kilowatt de puissance du groupe.

» L'eau est fournie aux condenseurs par une seule pompe de cir-

culatation à 2 rotors, d'un débit de 240 000 litres par minute, sous une pression de 5,40 m, qu'entraîne, à la vitesse de 350 t : min, un moteur asynchrone à 440 volts à couplage direct.

» Pour *réchauffer l'eau* qu'on retire du condenseur et qu'on renvoie aux chaudières, on a pourvu chaque condenseur d'un réchauffeur offrant une surface d'environ 87,5 m², ce qui suffit pour porter pratiquement la température de cette eau à celle de la vapeur à son échappement de la turbine.

» Comme *pompe d'extraction et pompe à air*, on a installé une pompe ordinaire d'extraction et une pompe Leblanc, sur un arbre commun *commandé par une turbine à vapeur*, l'un des éléments étant suffisant pour desservir le groupe à pleine charge, et l'un servant, par conséquent, de réserve à l'autre.

» L'eau condensée est envoyée par la pompe à travers le réchauffeur de 67,5 m² installé dans le condenseur, puis dans le réchauffeur d'eau d'alimentation, puis elle est reprise par les pompes d'alimentation de la chaufferie et envoyée aux chaudières à travers les économiseurs.

» La *vitesse du groupe* est de 1200 t : min.

» Sa *puissance* est de 30 000 kw sous facteur de puissance 85, soit 35 300 kv-a.

» Sa fréquence est de 60 *périodes* et sa tension de 12 000 volts.

» L'alternateur est du type courant, enroulé en étoile.

» Son refroidissement est assuré par un groupe ventilateur pouvant débiter 10 800 m³ d'air par minute, à moteur asynchrone fonctionnant, comme le moteur de la pompe de circulation et les moteurs d'économiseurs, sur un circuit triphasé à 440 volts, et comportant comme eux un équipement automatique à mise en marche par boutons-poussoirs, avec relais accélérateurs et contacteurs secondaires.

» *Groupe à action de 35 000 kw (fig. 9).* — Ce groupe est simple et compact, pourvu d'une distribution simplifiée comportant un régulateur primaire commandant par un levier à cames l'admission de la vapeur dans les ajutages à haute pression; et un régulateur secondaire commandant de même manière l'admission de la vapeur dans un des étages intermédiaires de la machine, et entrant automatiquement en action quand la charge du groupe atteint une valeur déterminée à l'avance. Cette disposition évite les multiples soupapes d'admission jusqu'ici employées.

» L'arbre du groupe tourne dans 4 paliers principaux, refroidis par circulation d'eau et pourvus du graissage à huile sous pression

entretenu par une pompe commandée par l'arbre du groupe; une pompe auxiliaire à vapeur assure le graissage lors de la mise en marche et fait place ensuite à la pompe entraînée par l'arbre.

» Le condenseur est accouplé rigidement à la turbine, mais supporté élastiquement au moyen de ressorts. Sa surface est de 5040 m².

» La pompe de circulation est à double rotor de 14,5 cm, d'un débit de 240 000 litres à la minute, sous une pression de 5,40 m,

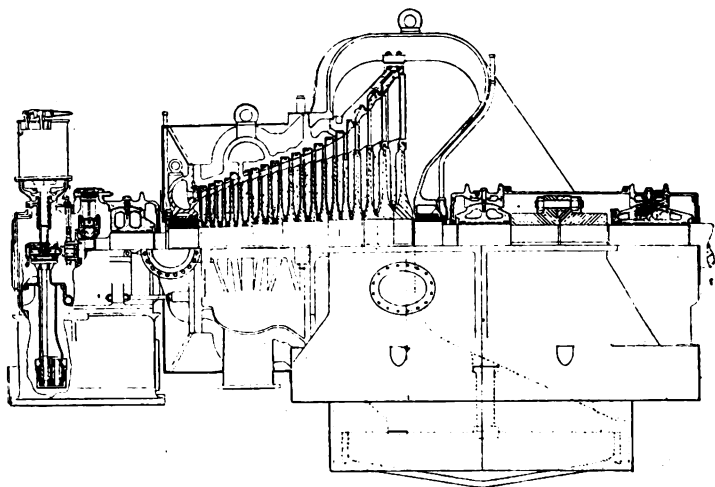


Fig. 9. — Coupe transversale de la turbine du groupe de 35000 kw de la General Electric Co., installé à North West Station de Chicago.

commandée, à la vitesse de 300 t : min, par un moteur asynchrone de 600 chevaux.

» Les *pompes d'extraction et d'air* sont ici *commandées par turbine*, une seule pompe mixte entraînée à 1500 tours par une turbine de 190 chevaux étant suffisante pour le service de l'installation, et un autre groupe identique lui étant adjoint seulement à titre de réserve et pour éviter les arrêts.

» Le réchauffage de l'eau est appliqué à ce groupe d'une manière qui ne diffère en rien de ce qui a été vu plus haut pour les autres groupes.

» Le groupe tourne à 1500 t : min et fournit du courant triphasé à la fréquence de 25 périodes.

» L'excitation est fournie à l'alternateur par une excitation de 110 kw sous 250 volts montée en bout d'arbre.

» Cet alternateur est refroidi par circulation d'air, mais aucun

ventilateur n'est nécessaire, le rotor lui-même étant disposé de manière à maintenir l'air en circulation.

» Les *calories entraînées* par cet air sont autant que possible *recupérées*, l'air étant envoyé aux foyers des chaudières au lieu d'être évacué au dehors.

» *Chaufferie.* — A chacun des trois nouveaux groupes alternateurs correspond une batterie de cinq chaudières tubulaires dont les éléments diffèrent très peu de ceux qui caractérisent la batterie décrite plus haut et correspondant au troisième groupe de la North-West Station.

» Même nombre de chaudières, même surface de chauffe.

» Surface de grille équivalant au $\frac{1}{10}$ au lieu du $\frac{1}{15}$ de la surface de chauffe.

» Même degré de surchauffe, mais pression un peu plus élevée, soit 16,8 kg par centimètre carré au lieu de 16,1 kg.

» Économiseurs peu différents de ceux du troisième groupe.

» Cheminée identique.

» *Nettoyage de l'eau par filtres mobiles.* — L'usine que nous venons de décrire représente une consommation d'eau de 1100 m³ à 1200 m³ par minute, et de grosses difficultés étaient à craindre du fait que les eaux de la rivière de Chicago sont souillées des matières de toute nature, surtout dans sa partie Nord qui fournit l'eau à l'usine. Aussi a-t-on reconnu l'insuffisance des châssis en toile métallique qu'on s'était contenté d'abord d'interposer sur le trajet de l'eau, à son entrée dans le tunnel, à section à peu près carrée de 3 m sur 3 m, qui alimente l'usine.

» La figure 10 nous montre les dispositifs définitivement adoptés pour le nettoyage de l'eau pour tous les groupes de l'usine, et même, plus récemment, pour ceux de l'usine de Fisk Street de la même Compagnie.

» Un rideau vertical en toile métallique subsiste à l'entrée de chaque dérivation amenant l'eau au tunnel, rideau qui, couissant dans les glissières, peut être levé pour nettoyage au moyen d'un palan électrique.

» Mais les matières qui peuvent encrasser ce rideau vertical sont d'avance réduites au minimum par les dispositifs que représente la figure :

» D'abord, une grille à larges ouvertures qui vient directement derrière la porte à guillotine commandant (par volant et vis sans fin) l'admission dans la chambre d'eau.

» Ensuite un rideau incliné présentant la disposition d'une chaîne sans fin et constituant l'élément le plus important pour le nettoyage de l'eau admise dans la chambre bétonnée qui donne accès au tunnel.

» Le rideau est formé de plusieurs sections en toile métallique, à mailles de 15 mm séparant des fils de 3 mm de diamètre, et entre les sections assemblées pour former un tapis sans fin sont montés des couvre-joints s'opposant à l'entrée des matières solides dans les joints. Toute la longueur de rideau non couverte par ces couvre-joints, c'est-à-dire la longueur presque entière du rideau peut être débarrassée des matières qui s'y accumulent sans qu'il soit besoin de mettre l'appareil hors de service; il suffit de mettre en marche le moteur électrique (de 5 chevaux triphasé à 60 périodes, 220 volts) qui peut lui imprimer une vitesse de 3 m par minute. Une rotation de quelques tours amène hors de l'eau la partie qu'obstruent les matières accumulées sur sa face extérieure, et il suffit d'un jet d'eau sur l'autre face pour effectuer le nettoyage. On peut d'ailleurs lever plus complètement le rideau, solidairement avec son châssis, en utilisant deux palans et en ayant soin de faire tourner le système autour du pivot qu'on lui a donné pour en faciliter le dégagement (à 75 cm environ au-dessous du plancher de la salle de manœuvre).

» Chaque rideau mobile constitue une unité séparée, suffisante pour nettoyer l'eau nécessaire à la production d'une puissance continue de 15 000 kw.

» NORTHERN ILLINOIS PUBLIC SERVICE CO. — *New high pressure Joliet plant.* — L'usine Joliet fournira par la suite des indications intéressantes sur les avantages à retirer de l'emploi des hautes pressions et des hautes surchauffes.

» Ses chaudières produisent en effet la vapeur à la pression de 22,8 kg par cm², et ses turbines fonctionnant à la pression d'admission de 21 kg, et avec une surchauffe supérieure à 125° C. C'est-à-dire que sa pression dépasse de 5 kg à 7 kg la valeur la plus souvent employée dans les installations américaines.

» Les avantages théoriques qui peuvent découler de l'emploi des hautes pressions n'ont plus besoin d'être démontrés. Quant aux difficultés que soulève une telle pratique, on les a résolues à l'usine de Joliet en utilisant plus largement l'acier, dans les appareils accessoires aussi bien que dans les économiseurs, en consolidant les tuyauteries et en les dotant de joints soudés à grande résistance.

» L'usine de Joliet, située sur la Des Plaines River, a été établie pour une puissance initiale de 20 000 kw, répartis en deux groupes turbo-alternateurs dont le premier fonctionne depuis le mois de janvier 1918 (fig. 11).

» Les chaudières sont de type normal Babcock et Wilcox, mais renforcées pour supporter l'augmentation de pression. Le collec-

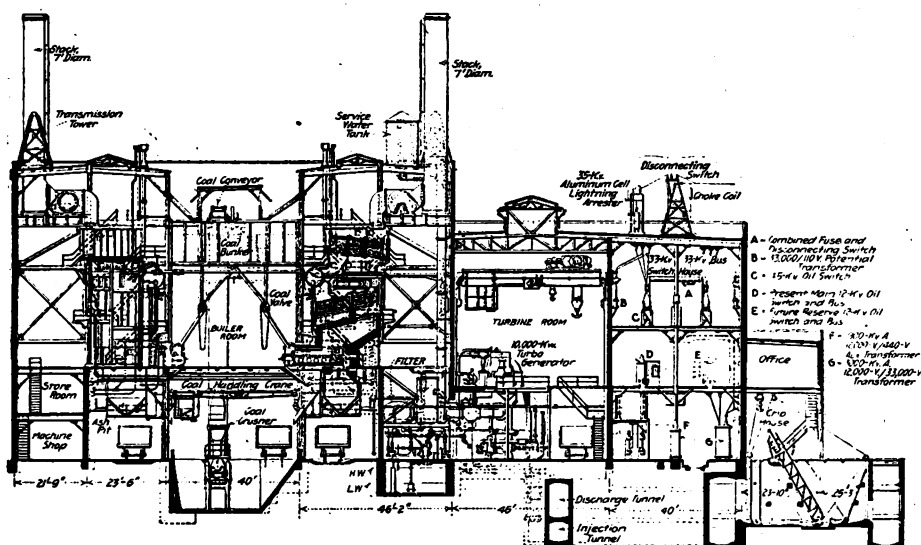


Fig. 11. — Coupe transversale de la station Joliet à haute pression et à haute surchauffe.

teur transversal comporte des tôles de 33 mm d'épaisseur. Partout les tuyauteries de vapeur sont augmentées d'épaisseur et diminuées de diamètre, pour répondre à la haute pression de vapeur.

» En raison de la surchauffe on a évité de leur donner une construction rigide, et pour faciliter la dilatation des tuyauteries, on a limité les segments de tuyaux droits et l'on a multiplié les coudes à long rayon de courbure.

» Les joints sont en acier, coulé pour les grosses pièces, forgé pour les petites. On a même pourvu les tuyauteries d'un diamètre supérieur à 100 mm de joints spéciaux à brides soudés et à boulons dont nous reproduisons la demi-coupe longitudinale dans la figure 12.

» Le serrage a pour but de résister à la pression de la vapeur qui tend à écarter les bouts de tuyaux. L'étanchéité est obtenue par une soudure opérée à l'extérieur, entre les lèvres des parties rabattues des tubes.

» C'est la première fois qu'aux États-Unis on a fait l'emploi d'économiseurs à tubes horizontaux entièrement en acier, surmontant les chaudières et formant partie intégrale de ces chaudières.

» La coupe de l'usine montre qu'on l'a construite sans soubassement, presque sans faire d'excavation dans le sol, dont la nature était favorable à ce mode peu commun de construction et offrait des fondations naturelles très solides. Cette disposition ne com-

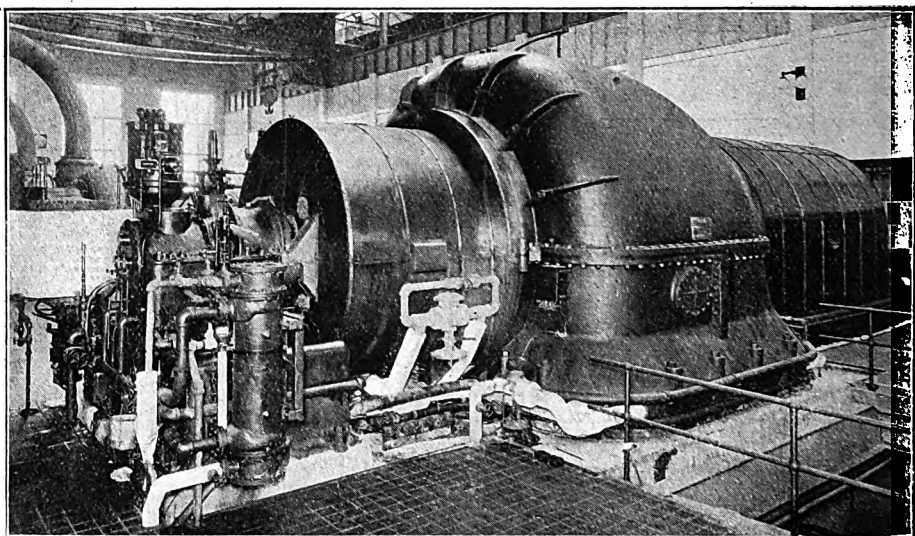


Fig. 12. — Turbo-alternateur de 50000 kw à 1200 t : min. de la General Electric C^e installé à Connor Creek Plant par la Detroit Edison C^e.

plique pas sensiblement l'apport des charbons aux trémies, et elle facilite l'enlèvement des cendres, qui sont directement déversées dans les wagons de chemin de fer, pour être évacuées de l'usine.

» A chaque turbo-alternateur de 10 000 kw correspondent deux chaudières offrant une surface d'évaporation de 893 m² chacune pourvue d'un surchauffeur de 28 m² et d'un économiseur de 606 m² environ. En réalité trois chaudières peuvent suffire en service normal à entretenir la marche d'un groupe, la quatrième chaudière restant en réserve, si la qualité du charbon consommé reste équivalente à celle du charbon de l'Illinois normalement brûlé à l'usine. La quatrième chaudière suppléerait à l'insuffisance du combustible en cas d'emploi de charbons inférieurs.

» Chaque chaudière, avec son enveloppe d'acier et son remplissage en maçonnerie, couvre une surface de plancher de 26,5 m² environ, et comme la puissance nominale de chaque générateur de

vapeur est estimé à 992 chevaux environ, la superficie couverte par les chaudières ressort à environ $0,027 \text{ m}^2$ par cheval.

» Du plancher de la salle des machines au centre du collecteur transversal, la hauteur s'élève à 8,08 m environ, et du plancher jusqu'au sommet de l'économiseur la hauteur atteint 12,80 m.

» Chaque générateur de vapeur comporte un seul foyer, mais dans ce foyer se déplacent deux chaînes Babcock et Wilcox disposées côte à côte, chacune de 2,44 m de largeur et 4,42 m de longueur environ offrant une surface de grille active de $10,45 \text{ m}^2$ environ.

» Cela fait pour les deux grilles une surface utile d'environ $20,90 \text{ m}^2$, soit $\frac{1}{3}$ environ de la surface de chauffe indiquée plus haut.

» Le ventilateur assurant le tirage des gaz à travers l'économiseur est à une hauteur d'environ 18,30 m au-dessus des grilles, et la cheminée en acier, d'un diamètre de 2,13 m environ, atteint la cote de 38,10 m au-dessus des grilles.

» Les gaz quittent l'économiseur à très basse température, et l'on n'a pour cette raison donné à la cheminée aucune autre protection qu'un vernis à base d'asphalte.

» L'économiseur, qui prend une importance particulière dans cette installation, rappelle absolument par sa construction la construction de la chaudière elle-même, au collecteur de vapeur près : ses tubes étant en acier étiré d'une épaisseur de 6,35 mm. d'un diamètre de 10,16 mm et d'une longueur de 4,88 m environ.

» On a galvanisé l'intérieur et l'extérieur des tubes pour les protéger contre la corrosion.

» Trois chicanes disposées verticalement dirigent l'écoulement des gaz qui sortent des foyers en trois courants traversant l'économiseur et, à la sortie de cet appareil, les gaz traversent un ventilateur commandé par un moteur de 150 chevaux et débitant 2100 m^3 de gaz par minute (avec une consommation de puissance voisine de 94 chevaux environ pour ce débit normal).

» Les gaz vont de l'avant à l'arrière, tandis que l'eau chauffée par l'économiseur va de l'arrière à l'avant, en partant du collecteur d'arrière et en traversant le faisceau tubulaire de l'économiseur, composé de 396 tubes de 10 mm de diamètre.

» En résumé, les facteurs ou coefficients suivants peuvent être retenus et comparés à ceux que nous venons d'indiquer pour les usines précédemment décrites.

» A une surface de chauffe de 1000 m^2 correspond une surface de grille de $23,4 \text{ m}^2$, une surface de surchauffeur de 313 m^2 , une

surface d'économiseur de 678 m² et une section de cheminée de 3,88 m².

» L'eau qui alimente les chaudières provient, en majeure partie, de la condensation, et avant de faire retour aux chaudières elle passe dans les tubes d'un appareil de préchauffage offrant une surface de 90 m² environ, logé dans une section d'un condenseur, et dans un réchauffeur d'eau d'alimentation, sous l'action de pompes d'extraction mues par moteurs électriques; les *pompes d'alimentation des chaudières et une pompe de 2400 litres, assurant le service d'eau, sont mues par turbines à vapeur.*

» Les pompes d'alimentation des chaudières sont des centrifuges, à quatre étages, pouvant débiter 1200 litres d'eau par minute sous une pression de 28 kg.

» Les turbines à vapeur qui les commandent ont une puissance nominale de 126 chevaux, et fonctionnent sous la pleine pression des chaudières, sous la commande de soupapes régulatrices.

» L'appoint destiné à compenser les fuites est assuré par un réservoir d'eau douce dans lequel sont recueillies toutes les condensations en valant la peine, de l'eau distillée y étant ajoutée, d'une autre source, dans telle mesure qu'il est nécessaire.

» Les vapeurs d'échappement disponibles permettent de porter la température de l'eau dans le réchauffeur d'eau d'alimentation jusqu'à 38° à 45° C., et, s'il y a insuffisance de vapeur d'échappement pour maintenir la température d'alimentation à cette valeur on prélève, au besoin, de la vapeur vive dans le quatrième étage de la turbine, automatiquement et par l'action d'un appareil à réglage thermostatique.

» L'établissement de l'usine au niveau du sol environnant a facilité l'établissement des voies d'accès.

» 1° Pour les approvisionnements (longeant l'usine pour aller au magasin);

» 2° Pour les cendres (sous la première batterie de chaudières);

» 3° Pour l'amenée du charbon (sous les silos);

» 4° Pour les cendres (sous la deuxième batterie de chaudières);

» 5° Pour desservir la salle des machines.

» Entre ces voies est aménagé un parc à charbons d'une capacité de 10 000 tonnes.

» Après broyage le charbon est élevé, par un convoyeur à godets mû par un moteur de 50 chevaux, au sommet des silos, d'une contenance de 450 tonnes et divisé en quatre compartiments correspondant aux quatre générateurs de vapeur.

» A chaque chaudière le charbon descend par une double canalisation se rendant aux trémies d'alimentation des deux grilles.

» Les cendres sont refroidies par pulvérisation d'eau, et recueillies directement sur les wagons qui doivent les évacuer à leur sortie des soutes.

» Chacun de ces deux groupes turbo-alternateurs peut fournir 10 000 kw à facteur de puissance de 80 pour 100, sous une pression de vapeur égale normalement à 21 kg par centimètre carré.

» Les alternateurs sont triphasés, 60 périodes, 12 000 volts, à la vitesse de 1800 t : min, et le rotor étant un inducteur tournant à quatre pôles.

» La distribution d'énergie se fait à 12 000 volts et à 33 000 volts, par un double jeu de barres-omnibus.

» Toutes les commandes électriques se font à partir d'une plateforme aménagée dans la galerie affectée au tableau de distribution de l'usine, et séparée de la salle des machines par une cloison vitrée.

» Cette salle de distribution, flanquant l'extrémité de la salle de machines du côté opposé aux chaudières, a une superficie de 12,20 m sur 36,30 m environ.

» Les panneaux de génératrices qu'elle contient sont des tableaux-pupitres; et les panneaux de feeders sont, au contraire, du type vertical ordinaire.

» Quant aux moteurs électriques auxiliaires, alimentés sous 440 volts, ils se commandent de la salle des machines à l'aide d'un panneau vertical.

» L'excitation des alternateurs est assurée par des excitatrices shunt de 100 kw à 250 volts, montées en bout d'arbre, et en cas de besoin par un groupe moteur générateur séparé de 150 kw.

» Chaque groupe générateur de 10 000 kw a une longueur de 10,21 m, une largeur de 4,04 m et une hauteur de 3,66 m au total.

» Ces chiffres correspondent à une surface de plancher de 40,8 m², soit une surface spécifique de 0,0041 m² par kilowatt environ.

» Le type de condenseur employé est à deux courants de vapeur, et comporte 3600 tubes de 25 mm de diamètre, représentant une surface de 1800 m², soit 0,18 m² par kilowatt de puissance d'alternateur.

» Chaque condenseur est desservi par une pompe de circulation débitant 12 000 litres par minute, et une pompe à air, système Leblanc, commandées toutes les deux par un moteur asynchrone à bagues de 200 chevaux; enfin par deux pompes d'extraction d'un

débit de 1440 litres par minute pour chacune, commandées par un moteur de 25 chevaux.

Ville de Detroit.

» DETROIT EDISON CO. — Cette Compagnie, sous la direction de MM. Dow et Hirshfeld, avait conçu et réalisé à Connor Creek une des plus modernes centrales américaines, que nous avons visitée en 1915 et décrit dans notre précédente Communication.

» *Connor Creek Plant.* — A cette station a été installé, depuis, un groupe de 50 000 kw de la General Electric (*fig. 12*).

» La turbine commande directement un alternateur triphasé, 60 périodes, 12 200 volts, relié directement à un transformateur élévateur, de 12 200 volts à 24 400 volts, remarquable en raison de sa puissance exceptionnelle et de ses rendements extrêmement élevés,

Pleine charge.....	99,4 pour 100
Trois quarts et demi-charge	99,5 »
Quart de charge.....	99,3 »

des principalement au montage de ses enroulements suivant le principe de ce que les Américains appellent le *compensateur*, et que nous appelons *l'auto-transformateur*.

» Les deux appareils en forment en quelque sorte un seul, dont le débit est commandé par l'interrupteur monte au côté 24 000 volts du transformateur.

» L'excitatrice de l'alternateur est directement en bout d'arbre, avec enroulement induit relié directement au circuit inducteur de l'alternateur, sans rhéostat de réglage interposé. C'est seulement en agissant par rhéostat sur le champ de l'excitatrice qu'on règle l'excitation et le voltage de l'alternateur de 50 000 kw.

» Le *condenseur* de ce groupe est de construction nouvelle, offrant une surface tubulaire de 6300 m² en tubes d'une longueur de 7,32 m.

» L'eau passe dans tous les tubes *dans un seul sens*.

» L'enveloppe est largement proportionnée par rapport à ces tubes, ce qui a permis de régler très favorablement la circulation de la vapeur. La position excentrique donnée au faisceau de tubes à l'intérieur de l'enveloppe laisse au bas du condenseur un espace vide en forme de demi-lune, disposé pour qu'une partie de la vapeur d'échappement de la turbine y arrive sans se condenser et, formant

volant de chaleur, empêche la température de l'eau condensée de tomber à une valeur trop faible.

» L'eau de circulation est fournie au condenseur par deux pompes à commande électrique à vitesse réglable.

» Les deux pompes sont nécessaires pour la pleine charge en été, une seule suffit en hiver.

» On a l'intention de mettre hors service en hiver les tubes inférieurs du condenseur, dans le but déjà indiqué plus haut d'éviter une trop basse température de l'eau condensée.

» La *pompe alimentaire* des chaudières est *commandée par une turbine à vapeur* (fig. 13).

» M. Hirshfeld signale, enfin, l'achat, pour l'usine de Connors Creek, de nouvelles chaudières, d'un type nouveau et de dimensions notablement inférieures à celles des chaudières en service. Leur pression de fonctionnement = $17,5 \text{ kg} : \text{cm}^2$, degré de surchauffe 110 à 125°C . au-dessus de la température de la vapeur saturée.

Ville de Windsor.

» GAZ AND ELECTRIC CO ET WEST PENN POWER CO. — Ces Compagnies, qui possèdent dans l'Etat « West Virginia » d'importants charbonnages, ont installé dans leur proximité, à Windsor, *une des plus modernes centrales*.

» *Windsor Power Station* (fig. 14). — L'idée qui a présidé à cette entreprise est celle même qui a donné de si heureux résultats dans l'utilisation économique des chutes d'eau à grande puissance, et il ne paraît pas exagéré d'y voir, en quelque sorte, les symptômes d'une ère nouvelle qui réalisera la production en masse de l'énergie électrique, à portée des mines où s'extrait le charbon nécessaire à l'alimentation des machines. L'usine de Windsor est la première centrale de grande envergure qui ait réalisé hardiment cette production sur place de l'énergie électrique, à l'aide de groupes à vapeur assez puissants, assez nombreux et assez modernes, pour répondre, dans de bonnes conditions de prix, à tous les besoins industriels d'une région qui, pourtant, paraît déjà riche en usines de faible ou de moyenne puissance.

» Un premier avantage de l'usine de Windsor sur les usines industrielles existant dans cette région tient aux impuretés de l'eau d'alimentation que les petites usines empruntent aux rivières locales, et aux arrêts ou détériorations qu'elles leur causent. La centrale nouvelle est abondamment pourvue d'eau de bonne

qualité, par le fleuve Ohio sur lequel elle est avantageusement placée. Son facteur d'utilisation est exceptionnellement satisfaisant, non seulement en raison du nombre et de la variété des industries desservies, mais encore pour la curieuse raison qu'elle est

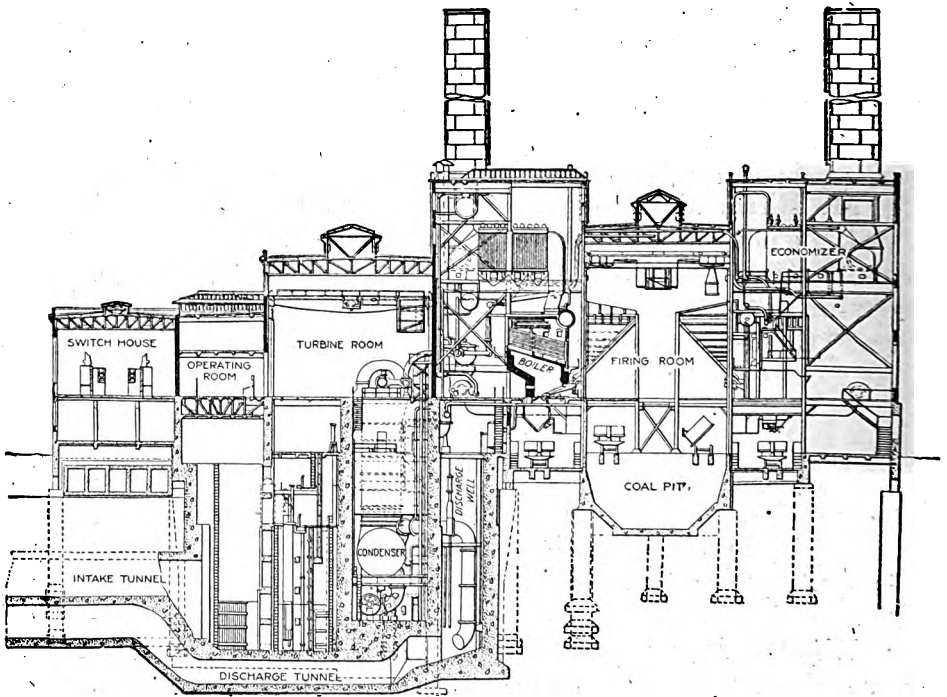


Fig. 14. — Coup transversale de la station Windsor.

placée à peu de distance du méridien qui sépare conventionnellement deux groupes d'Etats de la Confédération américaine dont l'activité se règle arbitrairement sur des horaires différents. D'un côté, c'est l'heure centrale; de l'autre, l'heure de Boston, et c'est une heureuse circonstance, puisqu'elle a pour effet de décaler de près d'une heure les horaires suivant lesquels les diverses charges sont jetées sur l'usine ou en sont retirées.

» Enfin, la meilleure garantie d'économie dont bénéficie cette centrale, c'est d'être située à 500 m ou 600 m d'une riche exploitation minière fournissant en abondance des charbons d'un pouvoir calorifique égal à 13 500 B.T.U.

» Il restait à équiper l'usine d'une manière toute moderne et économique, et pour cela le programme adopté a été le suivant :

» La puissance totale de l'usine a été fixée à 180 000 kw ou 200 000 kw.

» La puissance unitaire des groupes turbo-alternateurs à 30 000 kw et le nombre des unités à six, dont la moitié destinée à entrer en service à la fin de 1918 ou au début de 1919. Déjà la première unité était mise en service le 28 août 1917 et fournissait l'énergie à la ville importante de Canton, Ohio. Au commencement de l'année 1918, était mis en marche un deuxième groupe portant la puissance de l'usine à 60 000 kw; la demi-puissance est dépassée maintenant, et les derniers groupes seront installés sous peu de temps.

» A chaque groupe turbo-alternateur de 30 000 kw, 60 périodes, correspond une batterie de quatre chaudières d'une surface de chauffe égale à 1136 m² chacune.

» Chacune de ces chaudières, fonctionnant à la pression de 17,5 kg et à 139° de surchauffe, a son économiseur séparé de 776 m² et son ventilateur de 60 chevaux à tirage forcé (cheminée acier 3,90 m de diamètre et 34 m de haut), et ses grilles du type *underfeed stoker* comportant pour chaque chaudière un système à tirage forcé, par ventilateur de 100 chevaux fournissant une pression de 165 mm d'eau.

» L'usine, à 6 unités, a une superficie d'environ 85 m × 90 m.

» En une seule ligne les groupes turbo-alternateurs dans la salle des machines.

» En deux rangées les chaudières de chaque côté de la chaufferie, à laquelle le charbon est amené directement de la mine par wagons, et déversé dans une fosse centrale de plus de 10 m de longueur, d'une contenance de plus de 2500 tonnes, d'où il est repris pour être envoyé à chacune des trémies d'alimentation à l'avant de chaque chaudière.

» Les groupes turbo-alternateurs sont horizontaux, et groupés par paires de telle manière que la même fosse contienne leurs deux condenseurs, chacun offrant une surface de 4500 m² desservi par des pompes commandées par moteurs électriques.

» Le danger que présentaient les crues du fleuve Ohio a imposé aux installateurs certaines dispositions spéciales, notamment la pose des voies qui desservent l'usine sur des chevalements d'une construction assez coûteuse. Du moins en a-t-on tiré un certain avantage en aménageant sous ces chevalements des soutes à cendres si spacieuses qu'il n'est pas nécessaire de les vider fréquemment.

» Cette usine est, après celle de Detroit, une des premières dans laquelle a été réalisé le retour aux foyers de chaudières de l'air

de refroidissement des alternateurs, air qu'on recueille dans ce but après leur passage dans les machines et qu'on envoie par des canalisations spéciales aux ventilateurs de 100 chevaux qui assurent l'alimentation des foyers dans la chaufferie.

» Les groupes turbo-alternateurs produisent l'énergie sous forme de courant triphasé à 11 000 volts. Les câbles fonctionnant sous cette tension passent de l'usine dans une galerie parallèle affectée aux manœuvres, et de là dans une seconde galerie, également parallèle, d'où le tableau de distribution fait rayonner l'énergie dans différentes directions, en passant encore par l'intermédiaire d'installations transformatrices en plein air, dont une partie appartient à l'American Gas and Electric Co et une autre à la West Penn Power Co.

» Les fondations de l'usine ont été d'une exécution laborieuse et ont nécessité l'emploi de caissons, sauf dans la section remplie de béton qui est affectée aux appareils de condensation (*fig. 14*).

» Les pompes d'alimentation des chaudières sont commandées à vapeur, ainsi qu'une sur deux des pompes affectées à l'eau de compensation des fuites, qu'on prend simplement le soin de décanter et de filtrer.

» La grande profondeur des fosses des condenseurs (environ 22 m) a déterminé les installateurs à y faire emploi d'un ascenseur à commande par boutons.

» Les barres-omnibus de l'usine seront ultérieurement disposées en boucle et installées en double.

» Sur chaque boucle se succéderont différentes sections qui seront affectées séparément aux diverses unités en service simultanément, et que sépareront des réactances susceptibles de limiter éventuellement les échanges de courant. On prévoit la mise en court-circuit de la réactance qui sépare deux alternateurs au cas où l'un d'eux serait mis hors service; mais, pour éviter ce court-circuit, lorsque deux machines fonctionnent simultanément sur des sections voisines, on a établi un enclenchement entre l'interrupteur court-circuitant la réactance et l'interrupteur commandant les alternateurs.

» Les canalisations sont souterraines et rejoignent en tunnel les sous-stations installées extérieurement.

» Chaque alternateur porte en bout d'arbre sa propre excitation, susceptible de fournir 210 kw alors qu'il suffit normalement de 140. L'excitation se fait sous la tension de 250 volts, et des barres-omnibus à cette tension permettent de fournir, en cas de besoin, à une quelconque des machines, une excitation provenant, soit

d'une ou de plusieurs des autres excitatrices, soit d'un groupe moteur générateur de 150 kw, soit ultérieurement d'une batterie.

» Un réglage de tension est fait sur l'excitation des excitatrices, et le champ des alternateurs ne comporte pas même un rhéostat.

» Les auxiliaires étant à commande électrique, chaque groupe doit fournir une puissance de 1500 kva à 1600 kva sous 550 volts, et pour cela on a dû affecter à chaque groupe un transformateur réducteur de 1800 kva.

» On ne rattache à ce transformateur que les auxiliaires appartenant au groupe individuellement, et pour les services généraux de l'usine il est réservé deux autres transformateurs de 1800 kva.

» Quant aux moteurs de chaufferie, ils sont à courant continu, à 600 volts, et des groupes moteurs générateurs leur fournissent l'énergie.

» Les feeders rayonnant de la centrale constituent quatre groupes : le premier à 11 000 volts, le deuxième à 25 000, le troisième à 66 000 et le quatrième à 130 000.

» Les transformateurs élévateurs qui desservent les feeders à 66 000 volts et les feeders à 130 000 volts sont enroulés de manière à être interchangeables, c'est-à-dire que les mêmes appareils peuvent être utilisés comme matériel de rechange pour un groupe ou l'autre de feeders; on a d'ailleurs l'intention de porter prochainement à 130 000 volts les feeders qui fonctionnent encore à 66 000 volts.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

» **CARACTÉRISTIQUES DE STATIONS CENTRALES.** — Parmi les caractéristiques des stations centrales thermiques américaines, nous mentionnions, dans notre Communication d'il y a trois ans, tout particulièrement :

» *L'augmentation de la puissance unitaire des groupes électrogènes, laquelle est passée, en dix ans, de 5000 kw à 35 000 kw;*

» *L'augmentation de la vitesse des groupes électrogènes, portée de 750 t : min à 3000 t : min, pour les unités dépassant 10 000 kw;*

» *L'augmentation de la puissance unitaire des chaudières, laquelle est passée de la vaporisation de 8000 à 60 000 litres d'eau à l'heure;*

» *L'augmentation de la pression des chaudières, qui est passée de 6 kg à 18 kg par centimètre carré;*

» *L'augmentation de la surchauffe, la température de la vapeur portée jusqu'à 350° C.;*

» La *récupération des calories perdues* par rayonnement des différents appareils et tuyauteries de vapeur.

» Sur tous ces points, à peu de chose près, il y a aujourd'hui une avance assez notable.

» Nous avons actuellement : des groupes de 30 000 kw et 70 000 kw, des vitesses considérables de 1500 tours, pour des unités de cette importance, des pressions de vapeur de 24 kg par centimètre carré, des surchauffes correspondant à la température de près de 400° C.

» C'est ainsi que nous pouvons citer un groupe de 60 000 kw susceptible de fournir en surcharge 70 000 kw, soit (avec $\cos \varphi = 0,85$) 82 400 kVA.

» A côté de ce géant, il n'est pas sans intérêt de signaler pour se rendre compte du développement pris par les turbines, les petits groupes destinés à être installés sur les locomotives, pour fournir le courant d'éclairage, à savoir des turbines dynamo de 500 et même de 175 watts, dont la longueur dépasse à peine 50 cm et le poids 120 kg.

» Il est intéressant également de signaler les *groupes électrogènes à engrenages de Laval*.

» A l'aide d'un réducteur approprié, les vitesses des turbines et

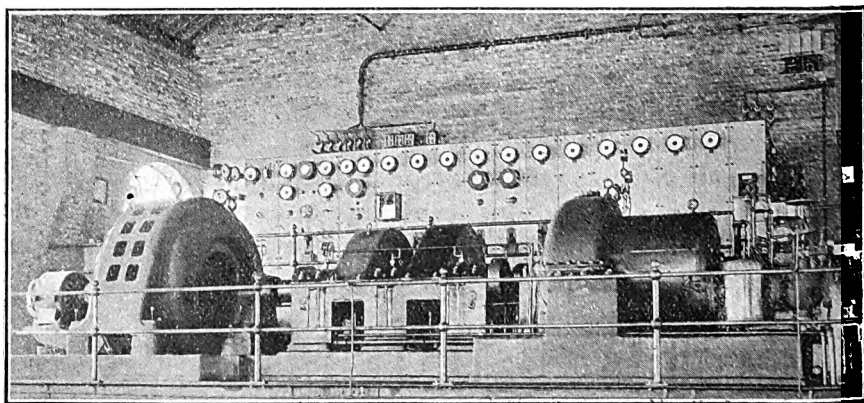


Fig. 15 — Turbo-alternateur de Laval de grande puissance à engrenages.

des génératrices peuvent être ainsi fixées aux valeurs les plus convenables pour chacun de ces appareils.

» Le groupe représenté à la figure 15 est un turbo-alternateur triphasé de 1200 kw, 25 périodes, 2200 volts. La vitesse de la turbine est de 3600 t : min, celle de l'alternateur 500 t : min.

» Étant donné que l'on fait couramment des engrenages pour 10000, 20000 chevaux et au delà, on peut constituer de ces ensembles de toutes puissances.

» C'est ainsi que sont construites les *turbo-pompes élévatoires d'eau de Laval*, dont nous pouvons citer plusieurs de 1500 à 2000 chevaux, installées dans les usines élévatoires d'eau de Pittsburg, Philadelphie, Cleveland, Davenport, Salem, etc.

» Un groupe de 5000 chevaux en eau montée est en étude.

» C'est certainement le plus puissant groupe élévatoire qui ait jamais été conçu.

» Les rendements sont très élevés, et les consommations de vapeur, de l'ordre de 5,8 kg par cheval-heure en eau montée.

» L'augmentation de la pression relativement plus rapide que celle de la surchauffe s'explique aisément.

» Théoriquement, l'augmentation de la pression est plus avantageuse que celle de la surchauffe.

» Cependant l'augmentation de la surchauffe présente l'avantage de réduire la densité de la vapeur et les pertes par frottement, elle sert également à empêcher les condensations, alors que les hautes pressions, augmentant la densité de la vapeur et les pertes par frottement, tendent à diminuer le rendement.

» **PROGRÈS.** — En fait de progrès, réalisés au point de vue des *rendements thermiques*, nous rappelions la marche ascendante depuis 1900 :

» (Par rendement thermique nous entendons l'inverse du rapport entre l'énergie calorifique du combustible et l'énergie électrique fournie au départ de la station.)

» 7 à 8 pour 100 dans une des premières centrales à turbines à vapeur;

» 12 à 13 pour 100 quelques années après;

» 17 pour 100 dans celles de 1914 à 1915;

» Nous avons actuellement 19 pour 100, ce qui correspond à une consommation de 18 000 B.T.U. (unités thermiques anglaises), soit 4535 *calories par kilowatt-heure*.

» Depuis 18 ans, le rendement total a donc été plus que doublé, et il a augmenté de 10 pour 100 depuis 3 ans.

» Comme le constate M. Richard Rice dans son « Aperçu sur le développement des turbo-générateurs » :

» La consommation des grosses unités a diminué de 50 pour 100, le poids de grosses unités a diminué de 70 pour 100, le prix de grosses unités a diminué de 60 pour 100 par kilowatt.

» Nous y trouvons un intéressant Tableau de consommation d'énergie calorifique dans les installations à moteur à gaz pauvre, à turbines à vapeur et mixtes : moteurs à gaz et turbines à vapeur.

INSTALLATION D'UNE PUISSANCE DE 20000 KW TRAVAILLANT EN CHARGE MOYENNE.

	Puissance comportant			
	les moteurs à gaz à pleine charge. à charge variable.		les moteurs à gaz et turbines à vapeur.	les turbines à vapeur avec 14 ^{kg} de pression 93°, 6 de surcharge et 94 pour 100 de vide.
	I.	II.	III.	IV.
<i>Consommation en B. T. U par kilowatt-heure.</i>				
Machines principales.....	17050	20060	19600	18050
Accessoires et pompes auxiliaires ..	850	850	750	1300
Dépenses spéc. aux mot. à gaz.....	500	500	400	"
Total en B.T.U par kilowatt-h ..	18400	21400	20750	19350
<i>Rendement thermique.</i>				
Machines principales (pour 100)....	20	17	17,4	18,9
Installation entière.....	18,55	15,9	16,10	17,6

» DÉVELOPPEMENT DES STATIONS CENTRALES. — Pour en donner une idée, complétons les chiffres précédemment donnés pour le montant d'énergie électrique fournie par les centrales de Chicago, entre 1895 et 1914, par ceux des dernières années.

» Alors que la vente du courant n'était que de 5 millions de francs ou 1 million de dollars en 1895, elle atteignait 10 millions de francs ou 2 millions de dollars en 1900, elle atteignait 25 millions de francs ou 5 millions de dollars en 1905, elle atteignait 60 millions de francs ou 12 millions de dollars en 1910, elle atteignait 100 millions de francs ou 20 millions de dollars en 1915 et près de 135 millions de francs ou 27 millions de dollars en 1918.

» On comprend, dans ces conditions, pourquoi les sociétés exploitant de grandes centrales se font acquéreuses de mines de charbon.

» Dans son Rapport annuel pour 1918, M. Samuel Insull, président de la Commonwealth Edison Co de Chicago, se félicite d'avoir pu traverser la crise exceptionnelle due à la guerre, grâce à l'acquisition, en toute propriété, de mines de charbon lui assurant un continuel renouvellement des stocks.

» Les réserves atteignent 460 000 tonnes.

» Les économies réalisées de cette façon se chiffrent à plus d'un million de dollars rien que pour l'année 1918.

» **RÉFLEXIONS RÉTROSPECTIVES.** — Je saisis cette occasion pour reproduire quelques images illustrant les réflexions rétrospectives faites lors de ma première Communication, concernant les turbines à vapeur, les grandes vitesses et les hautes pressions, ne serait-ce que pour rendre hommage à celui dont le génie a tracé, il y a plus d'un quart de siècle, la voie à suivre :

» 1^o Turbines d'action simples et compound;

» 2^o Très grandes vitesses rendues utilisables à l'aide d'engrenages réducteurs (il y a des engrenages simples réduisant la vitesse de 20 à 1);

» 3^o Générateurs de vapeur à très haute pression.

» La figure 16 représente le dessin original de la première *turbine compound* de Laval qui peut être considérée comme prototype des

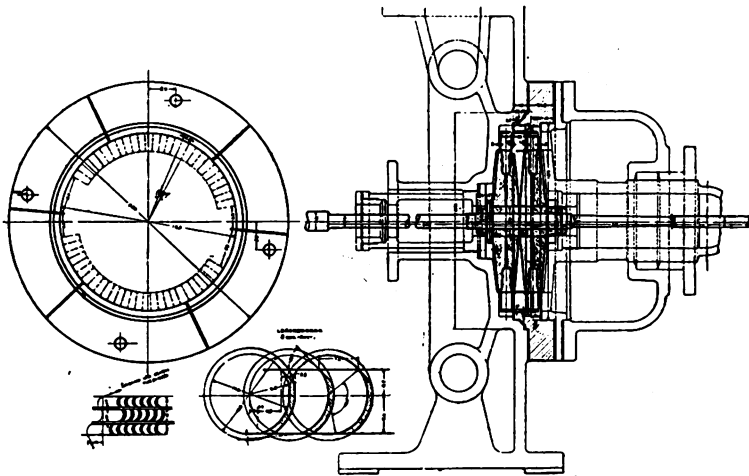


Fig. 16. — Reproduction du dessin original de turbine compound de Laval.

turbines de ce genre; lesquelles trouvent une très intéressante application dans leur accouplement aux pompes centrifuges à haute pression, à des vitesses variant de 3000 à 5000 t:m, pour constituer notamment des *turbo-pompes alimentaires des chaudières*.

» Comparés à des pompes à vapeur Duplex ou moto-pompes

triplex, ces groupes sont quatre à cinq fois moins lourds et six à sept fois moins encombrants, à capacité égale.

» La figure 17 représente d'une façon schématique une installation complète de *chaudière de Laval à 200 kg de pression*, avec tous ses accessoires, pompe d'alimentation, régulateur, etc., ainsi que la turbine à condensation utilisant cette haute pression.

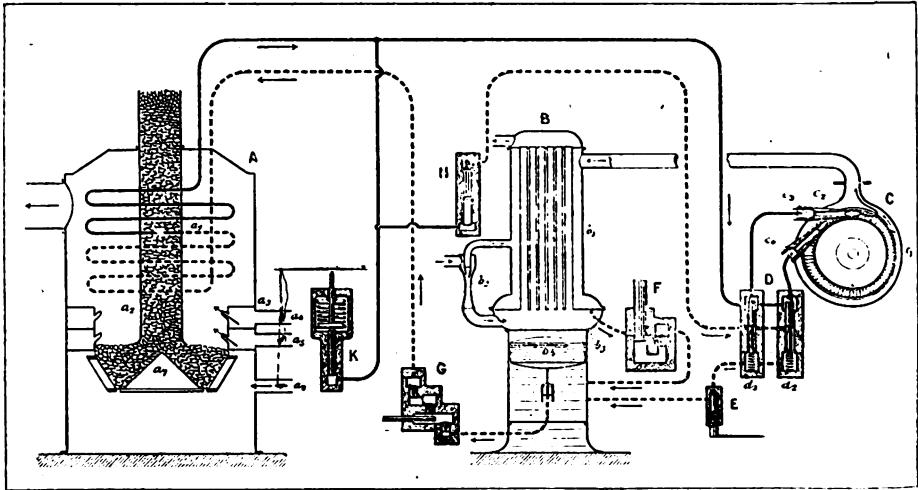


Fig. 17. — Schéma de la chaudière de Laval à 200 kg de pression : A, la chaudière; B, le condenseur; D, le régulateur d'admission de vapeur; E, le régulateur de pression d'eau; F, la pompe du condenseur; G, la pompe d'alimentation; H, l'appareil destiné à équilibrer la pression de la vapeur et de l'eau circulant dans le régulateur D.

» La station centrale de la Société de Laval, à Ierla, était ainsi établie en 1897.

» En terminant avec les stations centrales thermiques disons un mot des *centrales hydrauliques*.

» Une des plus puissantes stations hydro-électriques est celle de Laurentide Power Co.

» Actuellement il y a six unités de 17 500 kVA qui vont être complétées par trois nouvelles, en portant la puissance totale à 157 500 kVA.

» On cite : des turbo-alternateurs à axe horizontal, de 20 000 kVA triphasé, 50 périodes, 6600 volts, à 375 t : min; des turbo-alternateurs à axe vertical, construits pour le Niagara Power Co de 32 500 kVA, triphasés, 25 périodes, 12 000 volts, à 150 t : min.

» On envisage, dès à présent, la construction des groupes de tur-

bines hydrauliques verticales, accouplées à des alternateurs triphasés, 25 périodes, 12 000 volts de 44 000 kva, à 187 t : min.

Interconnexion entre les réseaux.

» La crise du charbon et celle des transports ont définitivement décidé les Américains à l'étude pratique du problème qui avait été déjà posé avant la guerre, c'est-à-dire le problème de l'interconnexion des réseaux électriques et des usines.

» L'avantage en est évident, puisque certaines usines ont à certaines heures une réserve d'énergie inutilisée, et que d'autres usines ont une charge différente et qui peut dépasser les réserves d'énergie dont elles disposent.

» L'Administration des Charbons et celle des Chemins de fer ont rivalisé de zèle pour faire admettre aux sociétés, jusqu'alors jalouses de leur indépendance, qu'il y avait pour elles un devoir de guerre à remplir en s'imposant une telle sujétion.

» La même situation a d'ailleurs eu en Grande-Bretagne les mêmes résultats qu'en Amérique, et l'on serait en droit de s'étonner qu'il n'en soit pas de même en France pour les motifs :

» 1^o Que l'interconnexion des usines mettrait à profit la diversité des charges individuelles et atténuerait leurs fluctuations;

» 2^o Qu'elle aurait l'avantage de mettre en commun les réserves jusqu'ici séparées et insuffisantes;

» 3^o Qu'elle entraînerait une économie de charbon, en donnant les moyens de faire fonctionner de préférence, aux charges les plus économiques les usines qui utilisent le mieux le combustible, et de réduire au rôle de réserve les usines ayant un fonctionnement moins économique;

» 4^o Qu'elle éviterait aux usines hydro-électriques le gaspillage de l'eau qui coule en surplus de leurs besoins locaux, et qu'elles laissent couler en pure perte, alors que, dans un rayon plus ou moins étendu, les exigences de la charge obligent d'autres usines à brûler du charbon;

» 5^o Qu'elle donnerait enfin une base d'organisation rationnelle aux industries de production et de transport d'énergie, et qu'elle fournirait des ressources nouvelles pour la réalisation des grands projets d'électrification, pour les chemins de fer et pour l'industrie.

» Des plans d'interconnexion parfaitement étudiés ont été dis-

cutés dans différentes régions des États-Unis, dans certains d'entre eux des essais ont été faits, et dans d'autres enfin les heureux résultats et essais ont entraîné l'adoption de mesures immédiates et de mesures définitives tendant à l'interconnexion permanente des réseaux.

» Dans l'État du New England, l'interconnexion projetée de 17 centrales et sous-stations a été étudiée dans tous ses détails et a fait l'objet d'un examen favorable, le Rapport de la Commission d'études ayant conclu à l'économie de 70 000 tonnes de charbon par an et de 50 000 kw de réserves, rendues disponibles pour un service utile.

» La Boston Edison Co et la New England Power Co procèdent en ce moment même à l'exécution d'une ligne d'interconnexion à haute tension qui coûtera 620 000 dollars, mais qui doit permettre aux intéressés d'échanger 15 000 kw à 20 000 kw, entre une centrale à vapeur et une usine hydro-électrique qui peuvent être d'un aussi grand service à l'un qu'à l'autre.

» Et ce n'est encore qu'un commencement.

» Dans le Wisconsin, une centrale à vapeur et une centrale hydraulique s'équipent de même pour échanger, sur une ligne à 44 000 volts, une puissance allant de 5300 kw à 17300 kw.

» Certains projets hâtivement réalisés donnent déjà d'heureux résultats : par exemple, l'Eastern Massachussets Electric Co, en dépensant 305 000 dollars pour relier les usines à 22 000 volts de Salem (17 000 kw) de Malden et de Revere, a économisé dès le premier exercice plus de 50 000 dollars de charbon.

» La Southern Sierras Power Co et la Nevada California Power Co, trop tard avisées du concours que leurs usines hydro-électriques seraient susceptibles de se prêter, ont installé des réseaux qui se prêtent mal à l'interconnexion; mais une étude ayant démontré que le concours d'une des usines pourrait épargner à l'autre usine hydraulique l'emploi de ses groupes de réserve à pétrole, on a fait l'interconnexion par l'intermédiaire d'un transformateur de 6000 kVA, et l'on a évité toute dépense de combustible.

» Dans l'État de New-York, six compagnies ont fait, à l'instigation de la Fuel administration, un essai d'interconnexion entre leurs usines hydrauliques et à vapeur, qui leur a permis de constater une économie mensuelle de 5000 tonnes de charbon, essai qui a, non seulement démontré les avantages de principe du système, mais encore fourni les éléments nécessaires à la mise au point définitive d'une entente permanente entre les Sociétés intéressées.

» Dans le Connecticut, un important programme d'interconnexion est en cours, qui paraît coûteux et complexe, autant en raison de l'étendue des territoires dont il intéresse l'activité industrielle que par l'importance et le nombre des usines en fonctionnement à des tensions très variables. Ces usines sont, soit des centrales à vapeur, soit des centrales hydro-électriques, soit des sous-stations, leur puissance individuelle varie entre 70 et 36 000 kw, et la puissance totale des usines en activité dépasse 250 000 kw, avec des tensions qui s'élèvent, suivant les cas, à 11 000, 13 000, 22 000, 33 000 et 66 000 volts. On cite même une interconnexion en cours entre deux réseaux américains dont l'un est à 25 périodes, et l'autre à 60, interconnexion qui sera coûteuse puisqu'elle exige un certain nombre d'appareils changeurs de fréquence.

» Si l'on veut apprécier les résultats et prédire l'avenir de l'interconnexion entre les usines, on se heurte évidemment aux difficultés d'une trop grande variété de circonstances.

» Mais on peut cependant juger de l'intérêt que présente la question, non seulement en s'aidant des quelques exemples que nous venons d'énumérer, mais encore en analysant d'un peu plus près les conclusions d'un projet récent d'interconnexion en cours d'étude aux États-Unis. Il doit réunir 25 usines représentant une puissance totale de 113 074 kw.

» La production annuelle est de 201 039 750 kw : h et le kilowatt-heure correspond à une consommation moyenne de 1,2 kg de charbon.

» Les charges totalisées donnent un maximum de 69 928 kw, faisant remonter par conséquent un surcroît de puissance disponible de $113\,074 - 69\,928 = 43\,146$ kw (sans tenir compte au fait que le décalage de temps contre les charges rendra disponible une somme de puissance encore plus grande).

» Cet état de choses permet de ne maintenir en service que les usines les plus économiques, en utilisant les autres à titre de réserves, avec une économie résultante qui ressort à $\frac{62}{100}$ de livre de charbon par kilowatt-heure, correspondant à une consommation annuelle de 445 160 dollars de charbon.

» Les dépenses d'interconnexion seraient inférieures à 2 millions de dollars, et l'entreprise est de celle qui ne présentent aucun aléa.

» Un curieux moyen de liaison entre usines aussi distantes a été mis en application par la Southern Sierras Co : c'est la transmission des ordres et signaux d'une usine à une autre, ou mieux à plusieurs autres, au moyen des signes de l'alphabet Morse et de la T.S.F.

» Le système a été mis à l'épreuve de la pratique et a donné de bons résultats.

QUESTIONS DIVERSES.

Transport d'énergie par courant à très haute tension et grande distance.

» Mise en service dans les premiers mois de l'année 1913, l'installation Bishop-San Bernardino (Californie) de la Southern Sierras Power Co eut quelques mois le privilège de détenir les records de distance et de voltage : 404 km et 150 000 volts.

» Elle offrait, en outre, les caractéristiques, nouvelles à l'époque, de ne comporter que des sous-stations transformatrices installées en plein air et de n'utiliser que des appareils de rupture de courant à l'air libre.

» Peu de temps après entra en service la première partie d'une autre installation Californienne utilisant la même tension de 150 000 volts (Big Creek-Los Angeles).

» Cette installation prévue pour 600 km est appelée ultérieurement à un développement encore plus considérable, les travaux devant durer 12 ans et la puissance transmise devant atteindre 350 000 chevaux.

» Pour donner à la ligne de transmission une régulation intrinsèque meilleure, à prix de revient égal, aussi bien que pour faire éventuellement un réglage du $\cos \varphi$ de l'installation, on a installé à l'usine réceptrice de Los Angeles deux unités de 15 000 kva à marche synchrone, jouant le rôle de condensateurs synchrones.

» Plus récemment, l'Aluminium Co of America de Marysville (Tennessee) a entrepris la réalisation d'un grand projet de production et de distribution d'énergie à 150 000 volts, qui portera ultérieurement sur une puissance totale de 350 000 kva.

» L'Usine actuellement en service comporte deux groupes alternateurs de 20 000 kva avec leurs transformateurs élévateurs.

» La ligne de transport de force traverse une région montagneuse et l'on trouve, sur son parcours, 9 portées de lignes à grande flèche d'une longueur moyenne dépassant 1500 m.

» Beaucoup de ces lignes, et notamment celles de Bishop-San Bernardino et de Big Creek-Los Angeles, sont établies en aluminium, soit sous la forme d'un alliage aluminium-cuivre, soit sous forme de câble aluminium-acier.

Traction électrique des chemins de fer.

» Nous avons exposé au commencement de 1916 les données que MM. Davis et Armstrong avaient fait connaître du projet grandiose de Chicago-Milwaukee-Saint-Paul.

» Nous n'avons plus besoin d'en souligner aujourd'hui l'importance, et à peine même le succès, que toute la presse technique a relaté.

» Pour la traction des *trains de voyageurs*, le Chicago-Milwaukee-Saint-Paul Railway est entré résolument dans une voie nouvelle, avec la certitude de ne pas s'y fourvoyer puisque le New-York Central Ry en a fait lui-même l'expérience et s'en déclare satisfait.

» Il s'agit du *montage direct des moteurs* de traction sur les *essieux*, c'est-à-dire de la *suppression des engrenages* interposés d'ordinaire entre les moteurs et les essieux, ce qui a pour effet de réduire beaucoup le poids mort et de supprimer les pertes mécaniques de la transmission par engrenages (*fig. 18 et 19*).

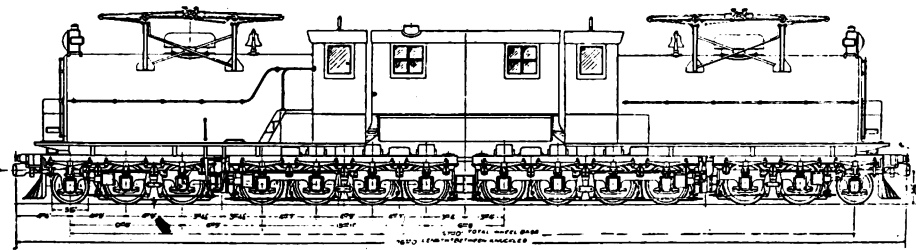


Fig. 18. — Locomotive électrique à voyageurs de Chicago Milwaukee St. Paul, 3000 chevaux, 3000 volts, courant continu, moteur sur essieux sans engrenages.

» C'est surtout aux grandes vitesses que les avantages ainsi obtenus ont une valeur appréciable.

» Le poids mort, qui dépassait 7500 kg pour chaque essieu des locomotives à engrenages du Milwaukee Ry, dépasse à peine 4000 kg pour chacun des essieux de la nouvelle locomotive.

» Ainsi qu'il le montrent les caractéristiques ci-après, on a donné à la nouvelle locomotive une grande flexibilité de vitesses, de sorte qu'en changeant le couplage des moteurs, on peut, non seulement pourvoir aux exigences d'un profil très accidenté, mais encore à la fois aux besoins de la traction des trains de voyageurs et de la traction des trains de marchandises.

» Le poids adhérent est d'ailleurs à peu près le même dans la

nouvelle locomotive que dans les précédentes, mais il est réparti sur 12 essieux au lieu d'être réparti sur 8.

» La *récupération d'énergie*, justifiée par le profil des lignes et réalisée déjà dans les locomotives à marchandises, a été maintenue dans la nouvelle unité, mais avec une simplification de moyens

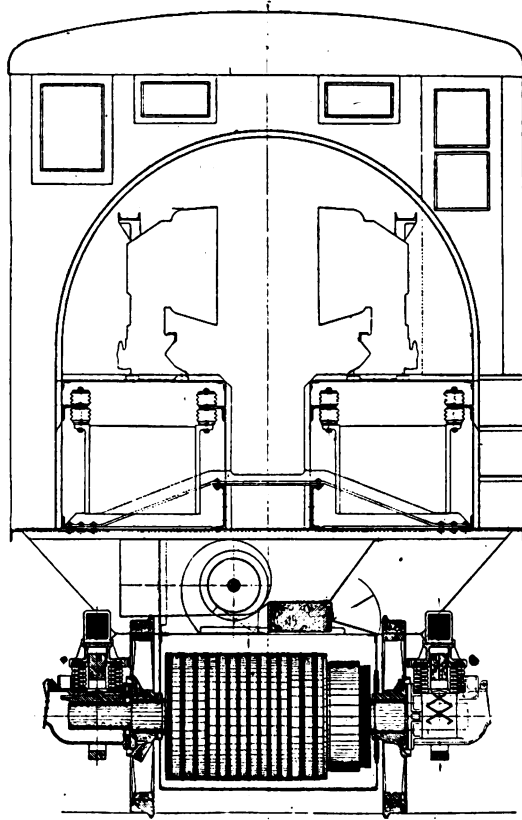


Fig. 19. — Locomotive de Chicago-Milwaukee-St. Paul montrant le montage direct du moteur sur l'essieu.

qui lui donne encore une plus grande valeur pratique. Indiquons seulement que cette simplification a sa source dans la suppression de l'excitation séparée par moteur-générateur qu'on donnait aux moteurs de traction dans les descentes, excitation dont l'expérience a démontré qu'on pouvait se passer, en réalisant un allègement et une simplification notable du matériel.

» La locomotive pèse 240 tonnes et, comme les précédentes, elle se divise en deux moitiés, mais ces moitiés, une fois assemblées, présentent 12 essieux-moteurs, encadrés par deux essieux-porteurs.

» Les 12 moteurs sont normalement accouplés par groupes de 3 en série, mais le contrôleur peut les accoupler par 4, 6 ou 12, afin de donner les quatre régimes de vitesse qui viennent en tête de la liste ci-dessous. Le cinquième régime, ou régime accéléré, est obtenu finalement par shuntage de l'excitation des moteurs :

Couplage des moteurs.	Vitesse en palier.	
	m : h	km : h
12 moteurs en série sans shunt.....	15	23
6 » 	29	46,4
4 » 	40	64
3 » 	49,5	79,5
3 moteurs en série avec shunt sur les inducteurs.....	63	101

» La vitesse maxima, qui atteint 101 km en palier, atteint encore 77 km : h en rampe de 5 mm par mètre; 62 km : h en rampe de 10 mm par mètre, 49 km : h en rampe de 20 mm par mètre, avec un train de 12 voitures et pesant 880 tonnes.

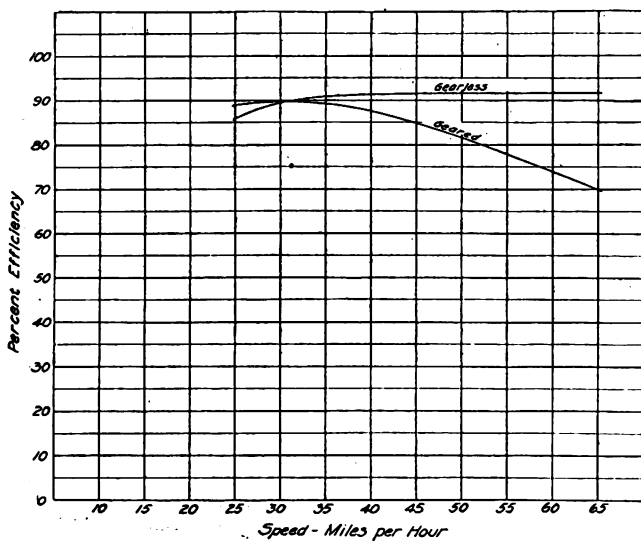


Fig. 20. — Courbes de rendement des locomotives avec et sans engrenages (« geared » and « gearless »).

» La puissance développée en service continu = 2800 chevaux; la puissance développée en service d'une heure = 3290 chevaux.

» L'effort de traction continu = 19 tonnes; l'effort de traction maximum = 41,5.

» Enfin l'accélération sur rampe de 2 pour 100 peut atteindre 0,48 km par heure par seconde.

» Les données numériques principales du tracteur sont les suivantes :

La longueur de la locomotive entre attelages....	23,17	m
L'empattement total	20,40	»
Le diamètre des roues motrices.....	1,12	»
Le diamètre des roues porteuses.....	0,914	»
La hauteur du centre de gravité.....	1,45	»
Poids total	240	tonnes
Équipement électrique.....	106	»
Partie mécanique.....	134	»
Poids par essieu-moteur	17,3	»

» A la vitesse de 50 m.p.h, la locomotive sans engrenage accuse un gain de 10 pour 100 sur le rendement de la locomotive à engrenages; à la vitesse de 60 m.p.h, un gain de 20 pour 100 (fig. 20).

» On estime que 25 pour 100 approximativement de 550 millions de tonnes de charbon consommées pendant 1917 aux États-Unis, l'ont été par les chemins de fer.

» Un des grands arguments en faveur de l'électrification des chemins de fer est l'économie de charbon. On voit par ce qui précède l'importance des hauts rendements.

Propulsion des navires.

» Disons quelques mots des tendances qui se manifestent dans la manière dont les Américains utilisent les turbines à vapeur pour la propulsion des navires.

» Les turbines à vapeur, dans cette application particulière, présentent de nombreux avantages sur les machines à piston, pour ne citer que :

» Plus grande vitesse pour un poids et encombrement déterminés des machines;

» Plus grand rayon d'action pour un poids déterminé de combustible;

» Plus grande capacité de cargaison;

» Moindre dépense de surveillance et d'entretien;

» Plus grande sécurité, à cause de la plus grande facilité de visites et réparations.

» Aussi, malgré quelques inconvénients, tels que la difficulté de réversibilité, qu'on est arrivé d'ailleurs à tourner assez conven-

blement par l'emploi de deux turbines, marche avant et marche arrière, sur le même arbre, la turbine tend à supplanter la machine à piston à bord, comme elle l'a déjà fait dans presque toutes les installations à terre.

» Nous nous trouvons en présence de *deux moyens de transmission de puissance du moteur à l'hélice* :

- » La transmission électrique, d'une part;
- » Les engrenages réducteurs, de l'autre.

» 1^o *Transmission électrique.* — Ci-après quelques chiffres donnés par l'amiral Griffin pour New Mexico :

- » Deux turbo-alternateurs diphasés de 11 000 kw;
- » Quatre moteurs asynchrones de 7000 chevaux;
- » Réglage de vitesse par combinaison de pôles;
- » Excitatrices de 300 kw, à turbine à vapeur échappant dans le cinquième ou sixième étage des turbines principales, avec un *by-pass* au condenseur pour service au démarrage.

» 2^o *Commande par engrenages réducteurs.* — La figure 21 représente une turbine marine de Laval, avec deux séries de disques marche avant et arrière, montés sur le même arbre.

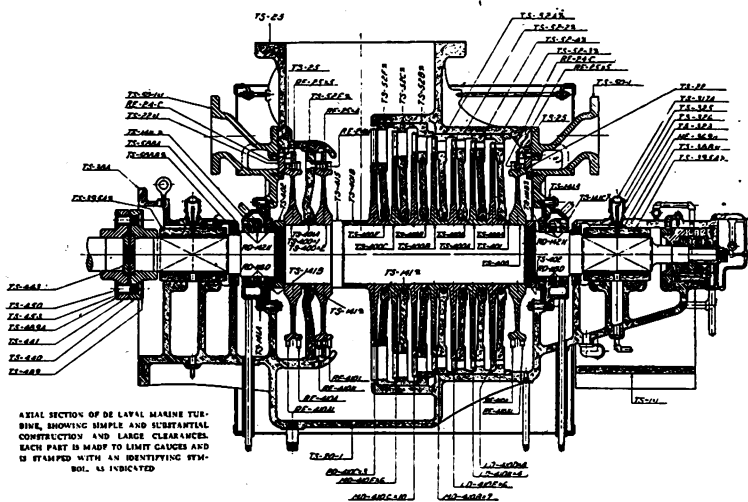


Fig. 21. — Coupe d'une turbine marine de la Société de Laval Steam Turbine Co.

» Cette turbine, d'une puissance de 3000 chevaux, à 3500 t : min, est munie d'un train double d'engrenages (*fig. 22*) réduisant sa vitesse à 90 t : min, pour accouplement direct avec l'hélice.

» Ce groupe a un encombrement de 6,50 m sur 3,300 m et 2 m de hauteur, soit 43 m³, et pèse 110 000 lbs (49 894 kg).

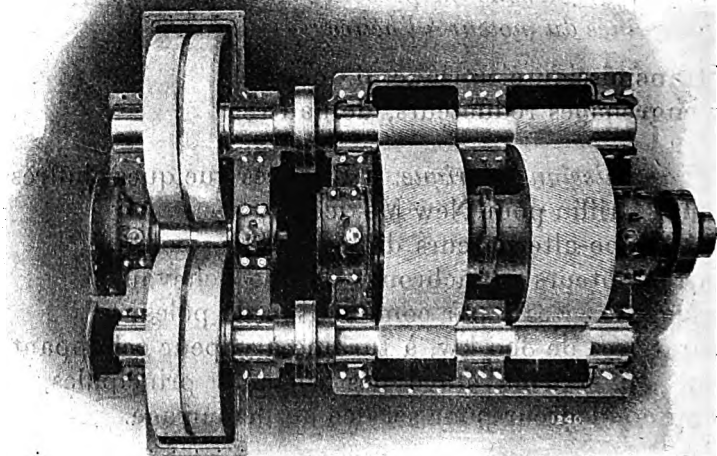


Fig. 22. — Double engrenage de Laval réduisant la vitesse d'une turbine de 3000 chevaux, à la vitesse de 3500 à 90 tours par minute.

» La machine à piston à triple expansion de 2500 chevaux, à 90 t : min, a un volume de 140 m³, et pèse 250 000 lbs (113 400 kg).

» Donc une économie de volume de $\frac{2}{3}$ et de poids $\frac{3}{5}$.

» La figure 23 représente un réducteur de vitesse à deux pignons, pour un rapport de 20 à 1.

» Le rendement des engrenages de Laval, constaté par les nombreux essais, atteint 99 pour 100. Leur usure est presque nulle.

» L'installation comporte un graissage automatique de tous les organes, graissage qui comprend également le filtrage d'huile à l'aide d'un *appareil rotatif* spécial du système de Laval, genre séparateur.

Téléphonie à grande distance.

» La plus longue communication téléphonique américaine atteint environ 6400 km à l'heure actuelle, c'est-à-dire qu'elle dépasse de près de 20 pour 100 la distance de New-York à San Francisco, qui est de 5400 km.

» Dans les centraux téléphoniques assurant les connexions entre lignes différentes, le nombre des lignes confiées aux opératrices

d'un même bureau paraît avoir atteint son maximum, ou du moins ne paraît pas accuser d'augmentation depuis quelque temps, ce nombre étant de 10 500 lignes bifilaires, desservant 1, 2 ou plusieurs abonnés et correspondant à une moyenne de 2 abonnés par ligne, soit 21 000 abonnés par opératrice.

» S'il semble que le degré de concentration des lignes dans un central soit arrivé à peu près à son maximum avec ce chiffre, il semble aussi qu'on ait tourné la difficulté en groupant dans le même bâtiment plusieurs centraux téléphoniques.

Téléphonie automatique.

» Nous avons dit en 1916 les difficultés que rencontrait la téléphonie automatique en s'attaquant aux grands réseaux urbains.

» Aussi les experts en téléphonie automatique et semi-automatique rivalisent-ils d'ingéniosité, en vue de faire servir au perfectionnement des communications téléphoniques toutes les ressources de la téléphonie automatique, en les associant à toutes les commodités de la téléphonie semi-automatique, particulièrement en réalisant des réseaux automatiques aussi parfaits que possible et en les reliant entre eux par l'intermédiaire d'opératrices utilisant le dicorde habituel.

Télégraphie et téléphonie sans fil.

» On sait que la distance New-York-Paris a été couverte le 20 octobre 1915 par des essais satisfaisants de transmission téléphonique sans fil, soit une distance de 6000 km environ.

» La téléphonie sans fil a également couvert la distance de New-York à Honolulu, soit 7840 km.

» Mais on tient la portée commerciale actuelle de la téléphonie sans fil comme étant plutôt de l'ordre de 800 km, alors que la télégraphie sans fil a déjà une portée commerciale de 8000 km.

» Il est encore trop tôt pour apprécier, dans toute son ampleur, le développement que les divers modes de « liaison » télégraphique et téléphonique ont pris ces derniers temps aux États-Unis, autant dans l'effort de la guerre que dans les industries de paix.

» Mais on peut déjà reconnaître la part considérable qui revient, dans les projets réalisés, aux applications heureuses des lampes à électrons.

» Aux États-Unis, les tubes à vide, ou lampes à électrons, sont

utilisés surtout à la téléphonie à grande distance, à la téléphonie sans fil et à la télégraphie sans fil.

» Ils comportent, en principe, une ampoule où le vide a été très poussé, et qui contient une cathode chauffée, une anode-plaque et une anode-grille. Parfois même l'action électronique s'y règle par l'addition d'une quatrième électrode.

» Dans les tubes employés aux États-Unis, la cathode est en général composée d'un filament de tungstène, surtout pour les tubes à électrons les plus puissants; pour les petites puissances on préfère souvent, au lieu d'une cathode en métal nu, employer une cathode composée d'un métal recouvert de certains oxydes réfractaires.

» Non seulement ces appareils constituent d'excellents détecteurs de T.S.F., mais leur emploi comme *amplificateurs* augmente beaucoup la portée de la téléphonie ordinaire, ainsi que de la téléphonie et de la télégraphie sans fil.

Stations en plein air (Outdoor Stations).

» Dans les circonstances où l'on a trouvé intérêt à faire appel aux sous-stations transformatrices en plein air, on a développé dans une large mesure l'application qu'elles faisaient du principe de l'automatisme.

Automatisme et commande à distance dans les sous-stations et dans les usines génératrices.

» On est arrivé à commander à distance, ou même à rendre automatique les opérations de mise en marche, de mise en charge et d'arrêt des commutatrices d'une sous-station, qu'on avait considérées, jusqu'à ces dernières années, comme exigeant la présence d'un personnel permanent.

» Au moyen de relais et de contacteurs, les opérations jusqu'ici exécutées à la main sont commandées et faites automatiquement en temps voulu, c'est-à-dire la sous-station mise en service totalement ou partiellement lorsque la charge l'exige, et arrêtée de même lorsqu'il le faut.

» Les appareils qui commandent et exécutent ces manœuvres doivent être évidemment sans défaillance.

» Il doit leur être adjoint des appareils de sécurité d'autant plus parfaits qu'aucun personnel n'est laissé sur place pour veiller aux accidents et en conjurer les effets.

» Le matériel fonctionne déjà et donne satisfaction dans de nombreuses sous-stations, et son fonctionnement s'est inspiré avec succès de l'expérience acquise avec les relais d'usine et les contacteurs industriels, qui commandent avec précision ou qui coupent sans détériorations de fortes intensités de courant.

» L'intérêt évident des sous-stations automatiques est de réduire les frais de personnel dans des proportions considérables (en général 60 pour 100), mais beaucoup d'autres avantages dérivent pratiquement de celui-là.

» Car la suppression du personnel permet de concevoir et de réaliser d'une manière plus rationnelle l'ensemble des installations que comporte un réseau de distribution : par un fractionnement plus poussé de l'énergie distribuée, par une multiplication des centres de distribution, par une moindre charge et une meilleure régulation de voltage en chacun de ces centres; par une économie de cuivre dans les feeders; enfin, par des mesures plus efficaces contre les courants vagabonds.

» L'expérience de l'exploitation a démontré, en outre, l'importance des économies qu'on réalise sur la marche à charge réduite des machines, les relais pouvant déterminer l'arrêt de toute machine, c'est-à-dire éliminer les pertes à vide de cette unité, lorsque la faible valeur de la charge ne justifie plus son maintien en service.

» Malgré l'attrait incontestable que chacun voulait bien reconnaître à cette application du principe d'automatisme, lorsqu'en 1914 elle fut proposée pour une première mise à l'épreuve aux États-Unis, le projet se heurta à beaucoup de scepticisme, et il fallut des succès répétés pour avoir raison de toutes les hésitations. Il fallut d'abord le succès remporté à Detroit, en 1912, par l'installation de trois stations d'éclairage à commande à distance sur le réseau de l'Edison.

» A la fin de 1915 fut réalisée, à Aurora-Elgin-Chicago la première installation absolument automatique.

» Dès qu'elle eut fait ses preuves, d'autres sous-stations automatiques s'installèrent, et fournirent bientôt de nouveaux arguments en faveur du système.

» Par exemple : La Des Moines City Railway Co reconnaissait, en 1916, l'intérêt qu'elle aurait à installer suivant le même système les sept sous-stations, et ultérieurement les 10 sous-stations de commutatrices nécessaires à son exploitation : elle enlevait pour 500 000 fr de cuivre de son ancien réseau de feeders et réalisait une économie de 700 000 fr en adoptant le principe d'automatisme.

» Bientôt la Kansas City Railway Co l'adaptait aussi à une sous-

station transportable qui allait aussi trouver de nombreux imitateurs.

» Parmi les nombreuses installations automatiques, transportables ou commandées à distance, signalons seulement les plus récentes.

» L'Ohio Electric Railways exploite une sous-station automatique d'une puissance de 500 kw, à 750 volts.

» Les New-York State Railways exploitent trois sous-stations automatiques et signalent l'énorme économie réalisée sur les pertes de l'exploitation à faible charge.

» La Columbus Railways C^o a appliqué les mêmes principes et le même matériel à la commande à distance d'une commutatrice de 500 kw, à 60 périodes. C'est par un dispositif à vibreur téléphonique que l'imminence des charges sur la sous-station est annoncée à l'opérateur qui doit commander la sous-station à distance.

» L'Iowa Railway and Light C^o a adjoint à son réseau une sous-station automatique de 500 kw, à 600 volts.

» La Rhode Island C^o, deux sous-stations à deux unités de 300 kw, à 25 périodes et à 600 volts.

» L'United Railways C^o de Saint-Louis, une sous-station automatique roulante.

» Enfin, la Long Island Railroad C^o détient le record de la puissance unitaire pour les sous-stations roulantes, avec un wagon sous-station comportant une commutatrice de 1500 kw, à 650 volts, 25 périodes et tous ses accessoires.

» Tandis que le Chicago, North Shore and Millwauke Railroad détient le record du nombre pour les sous-stations automatiques, ayant ajouté, aux huit sous-stations manuelles déjà échelonnées sur une ligne de 110 km environ, une sous-station roulante et quatre sous-stations automatiques qui ont tellement amélioré la distribution qu'il est résulté de leur adoption une économie de feeders de 650 000 dollars.

» Les principes de la commande à distance et de l'automatisme ont même trouvé leur application aux génératrices, car à Cedar Rapids fonctionne une usine hydro-électrique dont les trois groupes alternateurs (accouplés à des turbines à eau à arbre vertical) sont sous la double dépendance de la commande à distance et de la commande automatique.

» L'usine hydro-électrique à trois groupes de Cedar Rapids est à 1200 m d'une centrale à vapeur, et des relais ampèremétriques mettent en marche autant de groupes hydro-électriques que l'exige

l'état de la charge et que le permettent les disponibilités en eau du bassin de charge des turbines. Ainsi est réglé le fonctionnement normal, la charge étant de préférence portée par les groupes hydro-électriques de Cedar Rapids plutôt que par les groupes à vapeur de l'usine principale. Mais, en cas de besoin, la commande à distance, qui part d'un tableau spécial réunissant, dans l'usine à vapeur, les appareils de mesure et de contrôle de l'usine hydraulique, prend le pas sur la commande automatique, un simple bouton qu'on presse à l'usine principale arrêtant à la volonté de son personnel les groupes hydro-électriques de l'autre usine.

» Je saisis cette occasion pour remercier les personnalités et Sociétés américaines qui ont bien voulu m'aider dans la circonstance, au point de vue de la documentation : MM. Samuel-Insull, Lieb, Dow, Carl Hering, Hirshfeld, H.-W. Leitch, Armstrong, W.-S. Finlay, Garfield, Heaton, Johnson, Mailloux, Lawrence, J. Sorzano, etc.; les Sociétés : Bell Telephone C^o, Ford Factory, General Electric C^o, Westinghouse E. M. C^o, de Laval Steam Turbine C^o, Sargent and Lundy Engineers, etc.

» Permettez-moi de terminer ce court exposé par le même vœu que j'avais exprimé précédemment : Il faut que nos jeunes gens aillent en Amérique, pour compléter leur instruction, afin d'en profiter eux-mêmes, en même temps qu'en faire profiter les autres.

» Quand on y va sur le tard, comme c'est le cas presque général jusqu'ici, on éprouve un vif regret de n'y avoir pas été plus tôt.

» Cette idée fait, du reste, de plus en plus son chemin.

» A la dernière visite d'ingénieurs américains, qui a eu lieu il y a quelques mois, Américains parmi lesquels figuraient plusieurs professeurs, et anciens présidents de sociétés américaines d'ingénieurs civils, des électriciens, des mécaniciens hydrauliciens, on a, à plusieurs reprises, exprimé le désir de voir nos ingénieurs aller aux États-Unis, comme ceux des États-Unis venir en France, car il est évident que, si nous avons beaucoup à apprendre chez les Américains, ils peuvent, également, beaucoup apprendre chez nous ».

M. le PRÉSIDENT remercie M. Sosnowski.

Le dépouillement du scrutin étant terminé, M. le Président en proclame les résultats après avoir remercié les dévoués scrutateurs :

Suffrages exprimés.....	324
Majorité.....	163

Sont élus :

MM.	MEMBRES D'HONNEUR :	Nombre de voix obtenues.
Benoit (R.), Ancien Directeur du Bureau international des Poids et Mesures.....		324
Thury (R.), Ingénieur-Conseil de la Compagnie « l'Industrie électrique et mécanique ».....		324

PRÉSIDENT

pour l'exercice 1919-1920 :

Mazen (N.), Ingénieur en chef du Matériel et de la Traction des Chemins de fer de l'État.....	322
---	-----

PRÉSIDENT

pour l'exercice 1920-1921.

Abraham (H.), Professeur à la Sorbonne, Délégué à l'École Normale supérieure	320
--	-----

VICE-PRÉSIDENTS.

Eschwège (P.), Directeur de la Société d'éclairage et de force par l'électricité.....	321
Gratzmuller (L.), Ingénieur-Conseil	315

SECRÉTAIRES :

Pistoye (H. DE), Ingénieur en chef des Services électriques de la Société « l'Éclairage électrique ».....	321
Saget (J.), Ingénieur de la Maison Gallot et C ^{ie}	322

TRÉSORIER :

Brocq (F.), Directeur de la Compagnie pour la fabrication des compteurs.	324
--	-----

MEMBRES.

Pour trois ans :

Armagnat (H.), Ingénieur-Conseil.....	322
Arnoux (R.), Ingénieur-Constructeur.....	323
Bethenod (J.), Ingénieur-Conseil.....	323
Cornuault (A.), Sous-Directeur de la Compagnie Continentale des Compteurs.....	322
Courtois (G.), Directeur de l'Usine des constructions électriques de la Société Industrielle des Téléphones.....	321

Pour trois ans (suite).

David (Ch.) , Ingénieur-Conseil.....	322
Dusaugoy (E.) , Ingénieur civil des Mines.....	322
Duval (Ch.) , Ingénieur.....	323
Féry (Ch.) , Professeur de Physique et de Chimie de la Ville de Paris....	322
Guéry (F.) , Ingénieur, Chef des Services électriques de l'Omnium lyonnais.....	323
Jouaust (R.) , Chef de Travaux au Laboratoire central d'Électricité.....	323
Laporte (R.) , Sous-Directeur du Laboratoire d'Électricité.....	323
Lecler (H.) , Ingénieur des Arts et Manufactures.....	322
Meyer (Marcel) , Directeur de la Compagnie générale des Travaux d'éclairage et de force.....	322
Neu (L.) , Ingénieur-Conseil.....	320
Valbreuze (R. de) , Administrateur-Délégué des Anciens Établissements Deberghe et Lafaye.....	321

Pour deux ans :

Gourdeau (G.) , Ingénieur des Ateliers de constructions électriques du Nord et de l'Est.....	320
--	-----

Pour un an :

Legouëz (R.) , Administrateur de la Société Parisienne pour l'Industrie des Chemins de fer et des Tramways électriques.....	319
---	-----

COMMISSION DES COMPTES :

France (E. de) , Sous-Directeur commercial de la Compagnie Thomson- Houston.....	322
Lauriol (P.) , Ingénieur en Chef des Services d'éclairage de la Ville de Paris.....	324
Monmerqué (A.) , Inspecteur général des Ponts et Chaussées.....	324

Conformément à l'article 20 des statuts le projet de revision du règlement intérieur d'administration paru au Bulletin de février est soumis à l'Assemblée générale. Le résultat du vote est le suivant :

Pour l'adoption du projet.....	317
Contre » » 	7

Le projet de revision du règlement intérieur d'administration est adopté.

ALLOCUTION DE M. A. LARNAUDE, PRÉSIDENT SORTANT.

« Mes chers Collègues,

» Le rapport du Comité qui vient de vous être présenté par notre Secrétaire général, complété par l'exposé de la situation de l'École et du Laboratoire, vous montrent l'activité développée par notre Société pendant le cours de cette année.

» Je suis sûr d'être votre interprète en remerciant M. Janet et ses collaborateurs de leur effort et du dévouement qu'ils n'ont pas cessé de montrer.

» Grâce à ces efforts, l'École et le Laboratoire ont pu fonctionner pendant tout le cours des hostilités, et cela au milieu de difficultés que vous avez pu entrevoir.

» J'ajoute que si, à l'heure actuelle, ces difficultés ont changé d'aspect, elles n'en sont pas moins grandes, nos deux établissements disposant d'emplacement et de ressources notoirement insuffisants pour le rôle qu'ils ont à remplir.

» Votre Comité d'administration s'est depuis longtemps préoccupé de cette situation, il a étudié et mis au point un projet d'agrandissement dont il poursuit la réalisation.

» D'autre part, nous avons été appelés par le Ministre du Commerce pour collaborer à une Commission interministérielle chargée d'étudier les projets d'agrandissement du Laboratoire existant et de créer une organisation centrale de recherches scientifiques et industrielles.

» Cette Commission a été divisée en trois Sous-Commissions, dont la première, présidée par M. Millerand, s'occupe du développement des Laboratoires existants et en particulier du Laboratoire central d'Électricité.

» Nous avons eu à ce sujet de nombreuses réunions et, si aucune solution n'est encore intervenue, nous avons tout lieu de croire que nous arriverons à bref délai à une décision qui nous donnera satisfaction, c'est-à-dire permettra le développement indispensable de nos institutions (avec le concours de l'État, nous voulons l'espérer), mais en nous réservant l'indépendance de notre gestion.

» Malgré les conditions dans lesquelles nous nous trouvons, nous pouvons nous féliciter d'avoir pu permettre l'inauguration, dès cette année, du cours d'Électrotechnique générale créé par la Faculté des Sciences et professé dans notre amphithéâtre de la

rue de Staël par M. Janet; nous nous réjouissons également de voir rouvert et mis à la disposition des officiers de l'armée américaine, le cours de T. S. F. qui a été inauguré dans notre École.

» Grâce au concours de notre collègue le général Ferrié, nous pouvons montrer à nos alliés tout ce qui a été fait dans cet ordre de choses par la Science française.

» Vous savez quelle impulsion le général Ferrié a donné aux services qu'il avait à diriger pendant la guerre; aidé par les collaborateurs qu'il a su grouper autour de lui, il a pu donner aux applications de la T. S. F. un développement et une importance que l'on ne pouvait prévoir.

» Il est heureux de voir les résultats acquis condensés dans les conférences intéressantes organisées actuellement.

» En nommant Secrétaire général honoraire M. Sabourain, nous avons tenu à lui montrer combien nous avons apprécié son concours dévoué et son attachement à notre Société. Malgré son état de fatigue, il a tenu à rester à son poste jusqu'au jour où M. Joly a pu venir le relever de ses fonctions; nous lui en sommes sincèrement reconnaissants.

» Il me reste, mes chers Collègues, à vous remercier à mon tour de votre bienveillance à mon égard et à prier celui sur lequel viennent de se porter vos suffrages de vouloir bien, prendre place à ce fauteuil. Je n'ai pas à vous présenter M. Mazen, il est depuis trop longtemps notre collaborateur. Chargé depuis 15 ans du Cours de traction électrique à notre École, ses élèves savent avec quelle méthode et quelle clarté il sait les intéresser, joignant à son cours un relevé bibliographique minutieusement établi et soigneusement catalogué depuis des années.

» La haute situation occupée par M. Mazen à la Compagnie des Chemins de fer de l'État montre que l'estime que nous avons pour lui est partagée par tous ceux qui le connaissent. Nous le remercions de vouloir bien nous consacrer une nouvelle partie de son temps pour se charger de la présidence de notre Société. »

M. N. MAZEN, président entrant, prend place au fauteuil. Il remercie la Société du grand honneur qu'elle lui fait, l'assure de son entier dévouement et rappelle les éminents services rendus par M. A. Larnaude. Il évoque le souvenir de M. Devaux-Charbonnel.

La séance est levée à 22 h 25 m.

**PROGRAMME D'ÉLECTRIFICATION PARTIELLE DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS :
EXPÉRIENCE ACTUELLEMENT ACQUISE EN FRANCE ET A L'ÉTRANGER DANS
L'ÉLECTRIFICATION DES GRANDES LIGNES ;**

PAR M. A. MAUDUIT,
Professeur d'Électrotechnique à l'Université de Nancy.

(Suite.)

III. — SYSTÈME MONOPHASÉ.

Le courant monophasé n'est autre que le courant alternatif simple désigné sous le nom un peu barbare de monophasé, par opposition aux courants *triphasés* ou *diphasés*.

En traction électrique, le courant monophasé est utilisé à haute tension et basse fréquence (3000 à 15000 volts, 15 à 25 périodes par seconde).

Par rapport au triphasé, le système monophasé présente l'avantage immédiat de n'exiger qu'un fil aérien (au lieu de deux), le retour se faisant par le rail et la terre.

L'emploi d'une tension élevée au fil de contact (12000 à 15000 volts) permet d'espacer les transformateurs d'alimentation, sans consommer trop de cuivre dans les lignes; cette tension n'est limitée que par la difficulté d'assurer un isolement convenable de la ligne de contact, particulièrement dans les tunnels.

Chaque locomoteur porte un ou plusieurs transformateurs réduisant la tension à la valeur voulue pour les moteurs.

Le courant monophasé est utilisé de différentes façons, d'après la nature des moteurs :

Dans le système *monophasé direct* ou *monophasé pur*, on emploie des moteurs alternatifs à collecteur, série compensé, répulsion ou répulsion compensé, ou présentant une combinaison plus ou moins complexe de ces types fondamentaux; le transformateur réducteur placé sur la voiture est disposé de façon à donner au secondaire une tension variable, ce qui permet d'assurer à la fois le démarrage et le réglage de la vitesse; dans le système *monophasé-triphasé* appelé généralement *monotriphasé*, le courant alternatif est transformé en triphasé sur le locomoteur au moyen d'un convertisseur tournant, et l'on utilise des moteurs d'induction tri-

phasés ordinaires; enfin on peut obtenir un système *monophasé-continu*, en transformant, sur le locomoteur, le courant alternatif en courant continu, soit au moyen de redresseurs mécaniques d'un type quelconque (locomotive Auvert et Ferrand, en essais sur le P.-L.-M.), soit même au moyen de convertisseurs à mercure (essais en cours par la Société Westinghouse).

SYSTÈME MONOPHASÉ DIRECT.

DIVERS TYPES DE MOTEURS DE TRACTION. — Ce sujet a déjà été abondamment étudié dans le *Bulletin de la Société française des Electriciens* ⁽¹⁾; nous nous bornerons ici à indiquer les caractéristiques des moteurs les plus couramment utilisés.

Moteur série compensé. — C'est le moteur le plus employé aujourd'hui en traction monophasée.

Le moteur série compensé comporte un induit ou armature A avec collecteur et balais et un stator portant un enroulement inducteur principal E en série avec l'induit, et un enroulement de compensation C destiné à contre-balancer le champ de l'induit et par suite à diminuer l'inductance totale du moteur tout en assurant une bonne commutation. Cet enroulement compensateur peut être, ou fermé en court-circuit sur lui-même (moteur Lamme de la Société Westinghouse) ou embroché dans le sens convenable, dans le circuit de l'induit et de l'inducteur principal.

Le moteur série compensé en circuit, le plus fréquemment utilisé, n'est autre qu'un moteur série compensé à courant continu et peut fonctionner en alternatif ou en continu à volonté; toutefois, en courant alternatif, il exige une très faible fréquence, 15 à 17 périodes, tant au point de vue de l'obtention d'une puissance suffisante que de la réalisation d'une bonne commutation. La puissance maximum est, en effet, en rapport inverse de l'inductance et par suite de la fréquence.

Dans le moteur série compensé tous les champs sont alternatifs; l'enroulement de compensation et l'enroulement des pôles auxiliaires ajoutent leurs effets pour annuler le champ résultant extérieur sous les balais, et faire en sorte que la section se déplace sans

⁽¹⁾ *Traction électrique monophasée*, par M. LATOUR (*Bulletin de la Société française des Électriciens*, mai 1913). — Consulter aussi *La Traction à courant continu à haute tension*, par M. GRATZMULLER, même *Bulletin*, avril 1913.

couper le flux; mais ils ne suppriment pas la force électromotrice produite par la variation statique du flux résultant dans la section.

Cette force électromotrice est indépendante de la vitesse et proportionnelle au nombre de spires de la section, au flux produit par un pôle et à la fréquence : on peut la maintenir dans des limites admissibles, en adoptant une faible fréquence, des sections à une seule spire et un grand nombre de pôles de section modérée. Telles sont les raisons pour lesquelles le moteur série compensé ne peut fonctionner bien qu'à faible fréquence, à tension modérée et à des vitesses dépassant beaucoup le synchronisme.

On peut améliorer un peu la commutation en intercalant des résistances entre les sections et le collecteur (connexions résistantes du moteur Lamme), mais les meilleurs résultats sont obtenus en opposant à la force électromotrice perturbatrice d'origine statique une force électromotrice dynamique produite par la rotation de la section dans un champ convenable. La force électromotrice statique est en retard d'un quart de période sur le champ inducteur, tandis que la force électromotrice dynamique est en phase avec le champ qui la produit; il faut donc, pour obtenir une force électromotrice dynamique opposée à la force électromotrice statique due au champ principal, réaliser un champ en quadrature avec le dernier.

La meilleure solution est celle du D^r Behn Eschenburg, dans le moteur *Ærlikon* (*fig. 9 a*). En plus de l'enroulement de compensation C, le moteur comporte un enroulement auxiliaire W, embrassant seulement une dent qui forme pôle de commutation; cet enroulement W est shunté par une résistance ohmique S. Le courant correspondant est alors en retard sensiblement d'un quart de période sur celui du shunt et donne naissance à un champ qui se rapproche des conditions demandées. Seulement la force électromotrice correctrice ainsi obtenue est proportionnelle à la vitesse et, par suite, nulle au démarrage et un peu trop forte aux grandes vitesses; la pratique a montré que le moteur Behn Eschenburg a une commutation excellente.

Au lieu de shunter l'enroulement auxiliaire W par une résistance ohmique, on peut l'alimenter de diverses autres façons, par exemple en dérivation sur une portion fixe ou réglable du transformateur principal. Dans le moteur Jeumont cet enroulement W est monté en parallèle avec l'enroulement de compensation; une partie est établie dans les mêmes encoches, et l'ensemble présente une inductance notablement différente pour que les courants respectifs aient entre eux un décalage suffisant et qu'il se produise

ainsi un champ convenablement déphasé par rapport au champ principal.

Moteurs à répulsion. — La forme la plus simple du moteur à répulsion, pour traction électrique est due à Atkinson. Le primaire (fig. 9 c) comprend deux enroulements inducteurs E et E'

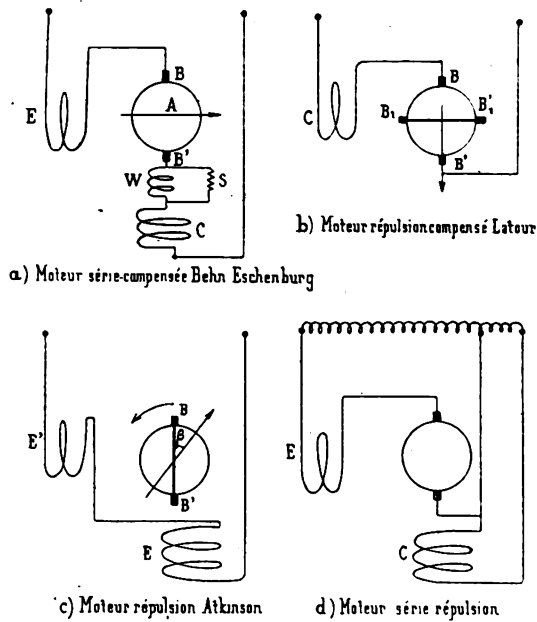


Fig. 9. — Moteurs monophasés de traction.

en série, disposés à angle droit sur le stator, et leur combinaison donne un champ suivant la flèche : les balais, en court-circuit, sont calés dans la direction du champ dû à l'enroulement E, le plus important comme nombre d'ampère-tours, afin que l'angle β soit plus petit que 45° et voisin de 15° à 30° . Pour modifier le sens de rotation, il suffit d'inverser l'un des deux enroulements, sans toucher aux balais.

Il est à remarquer que, pour passer du moteur-série compensé en circuit (type a) au moteur à répulsion (type c), il suffit de fermer sur elle-même l'armature A du schéma a, en reliant les balais en court-circuit : comme l'enroulement de compensation C a un nombre d'ampère-tours plus grand que l'enroulement inducteur E, c'est lui qui devient l'enroulement prépondérant E du type Atkinson. Ce changement de montage est quelquefois employé

au démarrage en vue d'améliorer la commutation, comme il sera expliqué ci-dessous; l'enroulement de commutation W est alors laissé hors circuit.

Dans le moteur à répulsion simple, la commutation, excellente au synchronisme, devient rapidement mauvaise pour les vitesses plus élevées, aussi ce moteur n'est-il pas utilisé en traction, en dehors de la période de démarrage; il s'accommode mieux des fréquences plus élevées, comme celles des réseaux de distribution d'énergie.

Le *moteur répulsion compensé*, dû à M. Marius Latour, est souvent employé dans les réseaux à 25 périodes, notamment en Allemagne (*fig. 9 b*).

Il est disposé comme un moteur en série simple, avec un enroulement fixe C en série avec l'armature, dont les balais sont calés sur la ligne neutre de cet enroulement. Deux autres balais placés dans l'axe du même enroulement sont fermés en court-circuit.

L'examen du fonctionnement de ce moteur montre que le champ principal est produit ici par l'induit, dans la direction de la flèche; les balais principaux sont en réalité les balais B, B', placés horizontalement, et l'enroulement fixe agit, non pour engendrer le champ, mais pour induire dans l'enroulement de l'armature, entre les balais B, B', le courant fondamental, et assurer en même temps la compensation du champ d'induit suivant cette direction.

La commutation est excellente, à tous les régimes, sous les balais BB', par suite de la présence des balais auxiliaires, qui mettent en court-circuit un enroulement de même axe magnétique que les bobines commutées sous ces balais BB', ce qui a pour résultat d'étouffer toute variation de flux dans ces bobines; sous les balais en court-circuit, la commutation est bonne au voisinage du synchronisme.

Le moteur a comme champ résultant, au synchronisme, un champ tournant, et aux autres vitesses, un champ elliptique.

Un autre type de moteur est celui qui est connu sous les noms de *moteur série répulsion*, *moteur à double alimentation* et *moteur à champ elliptique*.

Dans ce moteur (*fig. 9 d*), l'enroulement de compensation unique, au lieu d'être en série dans le circuit général, est branché en dérivation sur une partie convenable du transformateur principal : le flux transversal engendré par cet enroulement présente une certaine différence de phase avec le flux principal et produit, sauf aux faibles vitesses, une force électromotrice correctrice susceptible de contrebalancer suffisamment la résultante des deux

forces électromotrices perturbatrices. On évite le fonctionnement défectueux aux vitesses inférieures au synchronisme, en démarant suivant le montage en répulsion type *c*, ce qui s'obtient aisément par suppression de la connexion intermédiaire au transformateur et mise en court-circuit de l'armature.

Ce moteur a un champ résultant elliptique, et constitue un intermédiaire entre le moteur répulsion simple et le moteur répulsion compensé.

PROPRIÉTÉS DES MOTEURS MONOPHASÉS.

Régime de vitesse et démarrage. — Tous ces moteurs ont une caractéristique analogue du type série, c'est-à-dire que le couple varie en sens inverse de la vitesse et que le moteur développe une puissance sensiblement constante, à peu près comme le moteur-série à courant continu et comme la locomotive à vapeur. Aussi a-t-on coutume de dire que ces moteurs, comme le moteur-série à courant continu, sont particulièrement aptes au service de la traction; en réalité, l'aptitude particulière de ces moteurs au maintien d'un horaire, provient, non de ce qu'ils ont une caractéristique série, mais de ce que la présence d'un transformateur à tension secondaire réglable, permet d'obtenir à volonté des variations continues de régime, sous toutes les charges et sans pertes rhéostatiques, au lieu d'une gamme de deux à quatre vitesses comme dans le triphasé.

Le démarrage du locomoteur monophasé, avec tension aux bornes des moteurs progressivement constante, se fait avec une intensité de courant primaire beaucoup plus faible que dans tous les autres systèmes; pour un même couple, c'est-à-dire pour un même courant dans les moteurs, les courants absorbés sont en rapport inverse des tensions secondaires qui, au démarrage, sont souvent inférieures au tiers ou au quart de la tension normale.

Rendement et facteur de puissance. — Le rendement et, par suite, la puissance spécifique sont plus faibles dans les moteurs monophasés que dans les moteurs à courant continu. Pour un même couple qui dépend de la valeur efficace du flux, le flux maximum est plus grand et comme il est variable dans l'inducteur et dans l'induit, les pertes par hystérésis sont fortement augmentées.

Dans les moteurs à répulsion, les pertes hystérétiques peuvent être plus faibles, mais les courants n'étant plus en phase avec les flux, pour un même couple, les pertes joule sont souvent plus considérables.

Le facteur de puissance à faible fréquence, est assez bon pour le moteur série compensé; il atteint facilement 0,95 aux grandes vitesses et s'abaisse un peu aux vitesses plus faibles (0,85 à 0,90); dans le moteur Latour, il est égal à l'unité à une vitesse légèrement au-dessus du synchronisme et pour des vitesses plus élevées, le courant peut même théoriquement se décaler en avant de la tension comme dans un moteur synchrone surexcité; mais, en pratique, ce cas n'est pas utilisé, peut-être à cause de la mauvaise commutation.

Freinage et récupération. — Le freinage électrique avec récupération est difficile à réaliser dans le système monophasé, et bien que de nombreux schémas aient été proposés, nous n'en connaissons aucun qui fonctionne actuellement d'une manière vraiment satisfaisante.

Tout moteur à caractéristique série, même en courant continu, est impropre à la marche en récupération, une génératrice série ne pouvant fonctionner d'une façon stable sur un réseau à tension constante. En effet, lorsque par suite d'un à-coup, le courant débité par la génératrice vient à diminuer, sa force électromotrice décroît et le courant qui dépend de l'excès de la force électromotrice sur la tension du réseau, diminue de plus en plus, s'annule et s'inverse; la dynamo s'amorce alors à l'envers et tout finit par un court circuit formidable sous une tension plus que double de celle du réseau. Pour réaliser un fonctionnement stable, il faut transformer le moteur série en une génératrice à excitation shunt ou indépendante, dans laquelle la force électromotrice diminue d'une façon suffisante quand le courant débité augmente.

Ces propriétés persistent en courants alternatifs; mais, de plus, l'enroulement inducteur ayant une réactance considérable par rapport à sa résistance, le courant d'excitation et le champ produit sont alors en quadrature avec la tension appliquée à cet enroulement. Pour obtenir un facteur de puissance convenable, un système consiste à réaliser un champ sensiblement en phase avec le réseau, en utilisant une tension d'excitation en quadrature avec la tension du réseau.

Dans certains locomoteurs, on emploie le freinage rhéostatique, en excitant l'inducteur sur une portion du transformateur et fermant l'armature sur des résistances, toutes précautions étant prises pour que le moteur ne puisse s'amorcer en génératrice à courant continu, court-circuitée sur les résistances faibles des enroulements des transformateurs.

PRINCIPALES LIGNES ÉLECTRIFIÉES EN MONOPHASÉ DIRECT.

Le monophasé direct, à 16 périodes environ (15 à 17 périodes), a été adopté : en France, par la Compagnie du Midi, pour ses essais de traction (116 km en fonctionnement); en Suisse, pour le projet d'électrification générale des chemins de fer (décision de 1913), (ligne du Lœtschberg en service); en Allemagne et en Autriche, comme système réglementaire; en Suède et en Norvège, pour un certain nombre de lignes.

Le monophasé à 25 périodes est employé sur des lignes de banlieue en Angleterre, sur quelques lignes allemandes, mais il est surtout très répandu aux États-Unis, en Amérique, bien qu'un grand nombre d'installations de ce type aient été transformées, soit en monotriphasé, soit en continu.

Chemins de fer monophasés du Midi.

Les lignes actuellement en service, toutes à une seule voie, ont un développement total de 116 km, savoir :

Perpignan à Villefranche-de-Conflent (47 km) en palier jusqu'à Ille et de Ille à Villefranche, avec rampes courantes de 17 et maxima de 21 millièmes.

Lannemezean à Arreau (26 km).

Tarbes à Bagnères-de-Bigorre (22 km) et *Lourdes à Pierrefitte* (21 km).

De plus, les lignes de contact et d'alimentation sont installées entre Montréjeau et Pau, sur la ligne de Toulouse à Tarbes (112 km) et la guerre seule a empêché la mise en service de ce tronçon.

Sur la ligne principale, Perpignan à Villefranche, l'exploitation se fait par locomoteur pour un train de marchandises par jour dans chaque sens; sur cette même ligne et sur les autres, les trains de voyageurs sont constitués d'une automotrice et de quelques remorques.

Le parc comprend trois locomoteurs (Thomson, Westinghouse et Jeumont) et une trentaine d'automotrices Westinghouse.

Il n'est jamais fait usage de la traction multiple avec les locomoteurs : les automotrices sont munies de la commande à unités multiples.

SYSTÈME D'ÉLECTRIFICATION ADOPTÉ.

Monophasé 16,66 périodes, 12000 volts.

Ligne de contact. — La ligne de contact est du type caténaire

simple. Après divers tâtonnements, les constantes suivantes ont été adoptées :

Distance des supports.....	60 ^m
Écartement des pendules.....	3
Distance du fil de contact au porteur	{ maximum..... 1 minimum..... 0,20
Cote du fil de travail au-dessus du rail.....	

La figure 10 donne une coupe transversale par le support montrant la disposition de l'antibalançant. Le fil de contact est un fil

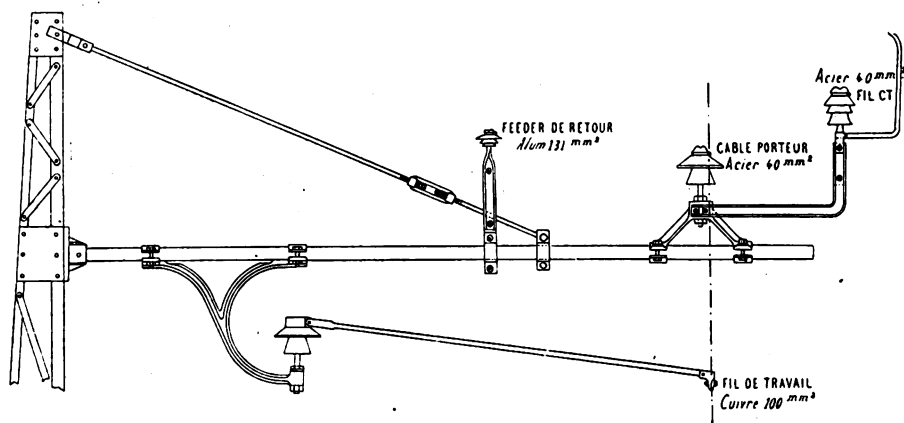


Fig. 10. — Ligne caténaire du Midi.

de cuivre rainuré de 100 mm² de section et le porteur un câble d'acier de 40 mm². Les pendules sont rigides au voisinage du sommet de la chaînette et souples aux abords des points d'attache. Les pendules rigides assurent la sécurité en cas de rupture et les pendules souples permettent un léger soulèvement du fil de travail dans la partie rigide du câble porteur. Les suspensions compensées ont été abandonnées; on se contente de disposer tous les deux kilomètres environ des tendeurs permettant de régler la tension à l'entrée des deux saisons, froide et chaude.

La vitesse maximum admise est 75 km : h et la suspension se comporte fort bien.

Les feeders d'alimentation sont en câble d'aluminium de 131 mm².

Sur la ligne de Villefranche seulement, ont été ajoutés (fig. 10) un fil de contre-tension semblable au câble porteur et un feeder de retour en aluminium de 131 mm² avec transformateurs suceurs tous les 4 km comme dispositif de protection contre les perturbations dans les lignes téléphoniques et télégraphiques.

LOCOMOTEURS. — *Conditions communes imposées.* — Ces conditions principales étaient les suivantes ⁽¹⁾ :

Remorquage sur la ligne de Ille à Villefranche, comportant des rampes de 17 mm et 21 mm, d'un train de 400 tonnes sans conditions de vitesse, d'un train de 280 tonnes à 40 km : h et d'un train de 100 tonnes à 60 km : h. Effort de traction maximum 12,5 tonnes; à 40 km : h, 8 tonnes; à 60 km : h, 4,2 tonnes. Poids total, 80 tonnes environ, avec poids adhérent 54 tonnes, sur trois essieux-moteurs. Empattement rigide au plus égal à 4 m.

Vitesse maximum 75 km : h.

Puissance unihoraire supérieure de 25 pour 100 à la puissance continue correspondant aux conditions de remorquage indiquées.

Fonctionnement en récupération dans les descentes.

Trois locomoteurs ont satisfait aux conditions exigées, sauf en ce qui concerne la récupération qui a été abandonnée, et la guerre seule a arrêté la construction des huit locomoteurs nouveaux commandés à chacun des trois constructeurs des machines adoptées, savoir : Westinghouse, Thomson et Jeumont.

Dans le *locomoteur Westinghouse*, les deux moteurs de puissance unihoraire individuelle 600 chevaux, sont à grande vitesse et commandent par engrenages cylindriques deux arbres de renvoi, d'où le mouvement est transmis par bielles triangulaires à l'essieu moteur central, qui entraîne par bielles d'accouplement les deux autres essieux. C'est une combinaison de l'attaque par engrenages et de la commande par bielles triangulaires très répandue sur les chemins de fer italiens.

L'alimentation des moteurs se fait par deux transformateurs dont les secondaires couplés en parallèle fournissent aux deux moteurs, également en parallèle, une tension réglable de 200 à 465 volts, avec sept crans intermédiaires (*fig. 11*). La prise sur chaque secondaire se fait par l'intermédiaire d'une bobine préventive A ou B et les deux secondaires sont couplés par une troisième bobine préventive C. Les neuf contacteurs (1 à 9 ou 11 à 19) sont alternativement réunis à l'une ou à l'autre des extrémités de la bobine

⁽¹⁾ *Revue générale des chemins de fer*, mars 1911 et *Lumière électrique*, 23 décembre 1911. — JULIAN, *Sur les projets d'électrification de la Compagnie des Chemins de fer du Midi* (*Bulletin de la Société française des Électriciens*, avril 1913, p. 333).

préventive, et sont verrouillés de façon que l'un seulement des contacteurs de chaque parité puisse se trouver fermé.

Le renversement du sens de marche se fait par inversion de chaque inducteur au moyen de quatre contacteurs. Tous les contacteurs sont du type électropneumatique et sont commandés par une

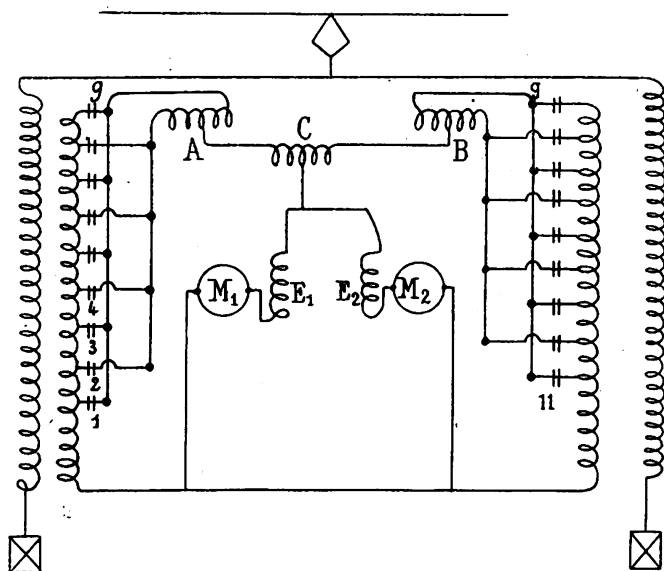


Fig. 11. — Schéma de traction simplifié du locomoteur 1-C-Westinghouse du Midi.

dérivation à 65 volts du secondaire du transformateur (contrôle à unités multiples).

Dans le locomoteur *Thomson*, les moteurs de même puissance, sont à faible vitesse et entraînent les trois essieux moteurs par deux bielles obliques attaquant deux faux essieux placés à l'extérieur des essieux moteurs et dans le même plan ; la disposition de cette commande est très analogue à celle des locomoteurs 2-C-2 Brown ou *Ærlikon* de l'État italien (fig. 8).

Les bobines préventives sont remplacées par des résistances et les contacteurs sont uniquement électromagnétiques, sans intervention d'air comprimé.

Les moteurs démarrent en répulsion (fig. 9 c) et fonctionnent ensuite en série-répulsion (fig. 9 d) et leur commutation est excellente.

Le locomoteur *Jeumont*, dont le poids total est 86 tonnes, soit 59 kg par cheval unihoraire, ne comporte ni bielles, ni manivelles, mais trois moteurs de 400-500 chevaux à refroidissement naturel,

attaquant chacun par engrenage et accouplement à joint universel, un des essieux-moteurs.

L'accouplement présente une forme originale (*fig. 12*). La carcasse du moteur ⁽¹⁾ et la roue d'engrenage prennent appui sur une buselure A entourant l'essieu-moteur, avec jeu pour la flexion des ressorts. Cette buselure est terminée par un balancier B por-

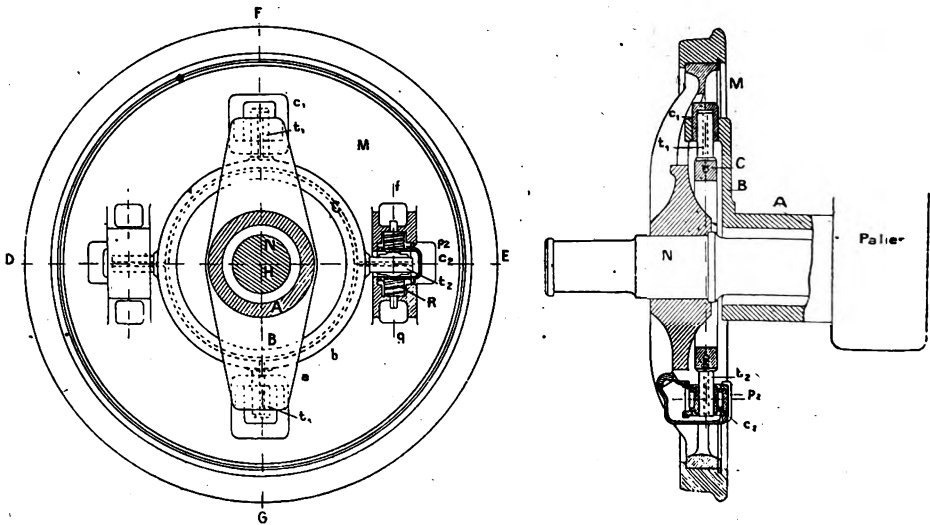


Fig. 12. — Dispositif d'attaque des roues par les moteurs.

tant aux extrémités d'un diamètre deux logements cylindriques pour des buselures en bronze. Dans ces buselures pénètrent deux tourillons t solidaires de l'anneau d'accouplement C; deux tourillons t^2 placés sur un diamètre perpendiculaire du même anneau se logent dans deux buselures analogues solidaires de la roue motrice, par l'intermédiaire de boîtes P_2 où elles peuvent se déplacer parallèlement à l'arbre L; entre les boîtes P_2 et la roue sont ménagés des ressorts R, qui constituent avec les ressorts du véhicule une véritable suspension de l'anneau C.

Les moteurs, à grande vitesse (450 t : m à la puissance de 500 chevaux) ont un rendement et un facteur de puissance de 0,87 et 0,93 à cette puissance et 0,85, et 0,95 à 400 chevaux. Ils sont du type série compensé spécial, indiqué plus haut, et ont une excellente commutation.

(1) *Revue électrique*, 14 juillet 1911 et *Bulletin du Congrès international des chemins de fer*, mars 1914.

Le réglage de la vitesse se faisait par introduction entre le transformateur et les moteurs d'un régulateur d'induction, dont le fonctionnement a donné lieu à diverses difficultés.

Dans les trois locomoteurs, il n'est pas fait usage de la récupération, mais seulement du freinage rhéostatique et encore d'une façon peu fréquente.

Le service imposé aux appareils n'a pas été suffisamment dur pour permettre de juger de l'endurance des moteurs et de leur puissance véritable; d'autre part, bien que la Compagnie du Midi n'ait pas voulu trancher définitivement la question de l'adoption ou de la suppression des bielles ou des engrenages, puisqu'elle a commandé à chaque constructeur huit locomoteurs (avec puissance unihoraire de 1800 chevaux, vitesse de 100 km : h et poids de 90 tonnes), elle a laissé entendre que la solution Jeumont avec engrenages et sans bielles lui paraissait la plus séduisante, surtout en vue de l'augmentation de la vitesse maximum admise.

Mode d'alimentation en énergie. — La Compagnie du Midi avait d'abord envisagé la production de l'énergie en courants monophasés à 16 périodes, et sa distribution aux sous-stations à la tension de 60000 volts et elle avait équipé son usine de Soulom, d'après ce principe. A l'occasion de la guerre, pour fournir de l'énergie disponible aux usines voisines, elle a modifié son organisation et installé des alternateurs triphasés à 50 périodes. Depuis ce temps, pour se conformer aux idées directrices émises par le Comité d'Électricité et en vue de pouvoir échanger de l'énergie avec les usines voisines, elle a décidé d'équiper ses usines génératrices en triphasé à 50 périodes.

Nous n'insisterons pas sur la disposition actuelle, exceptionnelle et transitoire. Disons seulement que la Compagnie du Midi avec ses usines de Soulom, la Cassagne et Fontpédrouse, en fonctionnement, l'usine d'Eget en construction, et les usines en projet de la Vallée d'Ossau, de la Vallée de la Têt et des Cévennes, disposera de la puissance et de l'énergie nécessaires à l'électrification prévue de 3000 km de son réseau.

Perturbations causées aux lignes télégraphiques et téléphoniques. — L'étude des perturbations causées aux lignes à courant faible a fait l'objet de nombreuses recherches et donné lieu à un grand nombre d'inventions qui ont été expérimentées avec plus ou moins de succès, dans la région du Midi. Sans rappeler la théorie de ces

phénomènes, qui a été en particulier exposée d'une façon magistrale par notre collègue Devaux-Charbonnel, dont M. le Président vient de nous apprendre la fin prématurée, nous allons seulement donner ici les résultats obtenus par la Compagnie du Midi, dans la lutte contre ces perturbations.

Les méthodes employées par la Compagnie du Midi sont de deux sortes :

a. Pour les lignes de la région de Tarbes, aucun dispositif spécial n'a été appliqué aux lignes de contact, mais il a été seulement inséré des appareils de protection dans les lignes à courant faible ;

b. Sur la ligne de Villefranche à Perpignan, des dispositifs spéciaux ont été introduits à la fois dans la ligne de contact et dans les lignes à courant faible.

a. Dans la région de Tarbes, ont été appliqués, aux lignes à courant faible, les dispositions suivantes :

Pour les lignes téléphoniques :

1^o Une demi-rotation tous les 250 m, au lieu de 1000 m ;

2^o A chaque entrée de poste, un transformateur de rapport égal à l'unité ;

3^o Au milieu de chaque ligne, un déchargeur avec condensateurs.

Pour les lignes télégraphiques avec appareils Morse :

1^o Lorsque la force électromotrice perturbatrice, d'origine électromagnétique, calculée sur la base de 0,1 volt par ampère-kilomètre est inférieure à 100 volts, une impédance Girousse (50 henrys et 2000 ohms) à chaque extrémité du circuit ;

2^o Lorsque, la force électromotrice perturbatrice est supérieure à 100 volts :

a. Une impédance (10 henrys et 300 ohms) en série tous les 4 km environ ;

b. A chaque extrémité du circuit, un shunt résonant Latour ;

c. Dans le circuit de réception, une impédance d'environ 30 henrys et 1500 ohms.

Dans la ligne télégraphique Hugues de Bagnères-de-Bigorre à Tarbes, on a installé un fil de retour et un déchargeur à condensateur, comme dans les lignes téléphoniques.

Dans ces conditions, l'expérience a montré que l'exploitation était convenable, pendant l'hiver, avec un trafic modéré, mais

que le problème ne pouvait être considéré comme résolu pendant la période d'été, où le trafic est notablement plus élevé.

b. Sur la voie de Perpignan à Villefranche (47 km), ont été installés un fil de contre-tension et des transformateurs suceurs.

Pour contrebalancer l'influence électrique, on dispose à côté du fil de traction, un conducteur, dénommé *fil de contre-tension* (fil C.T. de la figure 10), porté à une tension opposée à celle du fil de traction (au moyen d'un petit transformateur). En choisissant convenablement la tension (18000 volts environ), on arrive à neutraliser exactement l'action électrique sur un fil parallèle placé dans une position donnée par rapport aux conducteurs de traction et de contre-tension; alors, sur les conducteurs voisins, l'action, sans être nulle, est suffisamment faible pour être négligeable.

Pour diminuer l'induction électromagnétique, on supprime les courants vagabonds à travers la terre, et on les oblige à passer par le rail, ou mieux encore par un conducteur de retour placé près du fil de contact, ce qui réduit au minimum la surface du circuit perturbateur.

Pour cela, on emploie des *transformateurs suceurs* ⁽¹⁾, transformateurs de rapport sensiblement égal à l'unité, dont le primaire est intercalé dans le fil de contact et le secondaire dans le conducteur de retour, relié au rail au milieu de chaque intervalle entre deux suceurs.

En plaçant ces appareils à des écartements de 2 km à 4 km le long de la voie, on ramène presque complètement le courant de retour dans le conducteur spécial, pour toutes les sections qui ne comportent pas de locomoteur. L'induction magnétique est alors réduite à l'action : 1^o du courant dans le rail de la section dans laquelle se trouve un locomoteur; 2^o du flux provenant de la faible surface comprise entre le fil de traction et le conducteur de retour, et 3^o de la petite fraction du courant qui circule encore dans le rail et dans le sol, par suite de ce que les suceurs ne remplissent leur rôle que d'une façon approximative.

En plus de cette organisation spéciale de la ligne électrique, ont été prises les dispositions suivantes, dans les lignes de Prades à Perpignan qui suivent la voie du chemin de fer électrique sur une longueur de 40 km environ; dans les lignes télégraphiques Morse, il a été seulement intercalé des impédances à Prades; dans les deux circuits téléphoniques, ont été disposés à Prades comme

(1) Ch. DACHARY, *Revue générale de l'Électricité*, 3 mars et 7 avril 1917.

à Perpignan, des transformateurs de rapport égal à l'unité, sans autre protection.

Dans ces conditions, les résultats d'exploitation ont été les suivants :

Le fonctionnement de l'appareil Morse ne présente aucune difficulté; les lignes téléphoniques donnent une audition excellente, quand il n'y a aucun défaut d'isolement; on entend seulement un son musical léger, qui ne gêne pas la conversation, et qui est dû à la fois aux deux influences électrique et magnétique : régulier quand il n'y a pas de trains en route, ce son comprend un bruit variable avec la vitesse de la locomotive qui permet de suivre la marche des trains.

Par contre, le moindre défaut d'isolement sur une ligne téléphonique empêche absolument la communication, le bruit couvrant alors complètement la voix.

Ces résultats obtenus par la Compagnie du Midi, avec fil de contre-tension et suceurs, montrent qu'il est possible d'assurer un fonctionnement satisfaisant des lignes téléphoniques et télégraphiques, à côté d'une voie ferrée à traction électrique monophasée, tant qu'il ne s'agit que de lignes de longueur modérée et d'exploitation à faible trafic, mais il paraît peu probable que ce résultat puisse s'étendre au cas de longues lignes parallèles à des voies ferrées à grand trafic; il sera alors nécessaire, comme on l'a fait partout, en Suisse et Italie notamment, d'éloigner les lignes ou de les mettre sous câbles.

Suisse.

LIGNE DU LÖETSCHBERG.

Renseignements généraux de traction. — La ligne du Löetschberg, de la Compagnie des Alpes Bernoises, suit le parcours Berne-Scherzligen-Thoune-Spiez-Fruetigen-Brigue et rejoint, à cette dernière gare, la ligne du Simplon. Les premiers essais de traction électrique furent entrepris sur la section Spiez-Fruetigen, en courant monophasé à 15 périodes et 15000 volts, vers 1908, avec des automotrices à quatre essieux, de 900 chevaux, puis deux locomoteurs CErlikon de 2000 chevaux, livrés en 1910, pendant que s'effectuait la construction de la ligne du Löetschberg proprement dite; cette ligne fut inaugurée solennellement le 28 juin 1913, ouverte à l'exploitation électrique le 15 juillet suivant pour le service local et finalement le 18 septembre pour le trafic international.

La figure 13 donne le profil de la ligne entre Spiez et Brigue; cette ligne s'étend sur 75 km et est à simple voie, sauf dans le tronçon Kandersteg à Goppenstein, qui contient le grand tunnel du Lötschberg, long de 14,6 km avec point culminant à la cote 1244 m. Les pentes dans le tunnel sont de 7 mm à la montée (vers le sud) et 3,8 mm à la descente; des deux côtés, les rampes d'accès comportent des déclivités de 27 mm par mètre : la déclivité

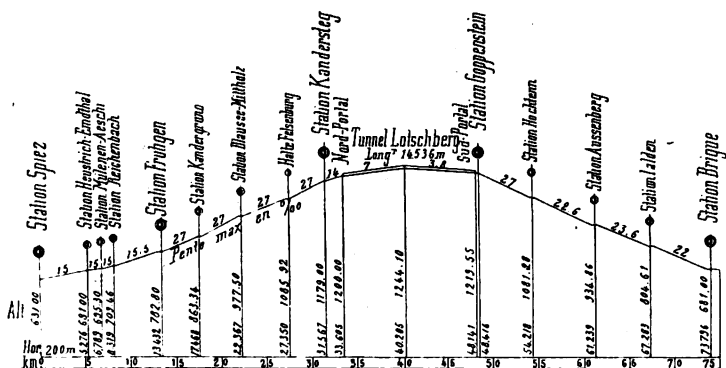


Fig. 13. — Profil en long schématique de la ligne des Alpes Bernoises.

moyenne est de 17,4 mm sur la rampe nord et 20,7 mm sur la rampe sud; le rayon minimum des courbes est 300 m.

Le tronçon de Thoune-Scherzligen à Spiez (10 km) a été électrifié ensuite et mis en service tout dernièrement; le tronçon Berne-Thoune est lui-même en cours d'installation.

L'horaire comportait, pour l'hiver 1913-1914, par jour dans chaque sens, 5 trains express, 3 trains omnibus, 4 trains de marchandises réguliers, plusieurs trains facultatifs, soit au total 2200 à 2400 trains : km (de Spiez à Brigue) ou environ 600 000 Tkm

TYPE D'ÉLECTRIFICATION ADOPTÉ.

Monophasé 15 000 volts, à 15 périodes par seconde.

Ligne de contact. — Cette ligne est constituée par un fil de cuivre de 100 mm² de section, à suspension caténaire simple, avec câble porteur en acier de 50 mm² de section et pendules en fil d'acier à écartement de 4 m. Les fils de contact, par tronçons de 1200 m à 1500 m sont reliés (sauf en tunnel) à des poids tendeurs d'environ 400 kg.

Les supports de la ligne sont en fer; en pleine voie, ce sont des

fers profilés type Differdange; dans les stations sont employés des portiques en treillis. La portée normale est de 60 m en alignement droit. La hauteur du fil de contact au-dessus du rail est 4,80 m sous les tunnels, 5,70 à 6 m en pleine voie et 6,70 m dans les stations.

La ligne de contact est divisée en quatre tronçons, Thoune-Spiez-Kandergrund-Kandersteg-Brigue; le premier tronçon est alimenté au Nord par l'usine de Spiez, le second à volonté au Sud par Spiez et au Nord par l'usine de Kandergrund, le troisième et le quatrième exclusivement par l'usine de Kandergrund, le troisième directement, et le quatrième par un feeder de 100 mm² (2 fils de 8 mm en parallèle). De plus, un fil d'alimentation court le long de la voie, relié au fil de contact; à chaque station, la ligne de contact forme quatre sections, branchées par des interrupteurs indépendants sur le fil d'alimentation : pleine voie nord, pleine voie sud, voies principales de la station, voies de marchandises et de garages. Le fil de contact sert donc, en parallèle avec le fil d'alimentation, au transport de l'énergie, sauf pour les voies de la station.

Dans chaque poste de couplage de station, un solénoïde excité par le courant de ligne actionne, en cas de court-circuit, une sonnerie d'appel : on sait ainsi immédiatement dans quelle section s'est produit ce court-circuit.

L'isolement est double partout sur la ligne de contact. La protection contre la foudre et les surtensions est assurée par un parafoudre à cornes avec résistances en carborundum à chaque poste, et surtout par quatre résistances métalliques, absorbant chacune 10 kw, montées en dérivation *d'une façon permanente* entre le fil de contact et le rail, aux points suivants : Scherzligen, Spiez, Kandergrund et Brigue. Au début de l'exploitation, il y a eu un grand nombre de ruptures d'isolement, tant sur les lignes de contact que dans les galettes à haute tension des transformateurs; depuis que l'on a installé les résistances métalliques et renforcé l'isolement des premières galettes des transformateurs, ces accidents sont devenus très rares.

LOCOMOTEURS.

Un premier locomoteur d'essai de 2000 chevaux, du type C + C, fut fourni par *Ærlikon*; sa disposition de commande mécanique ayant donné de grands mouvements de lacets au-dessus de 50 km : h, il n'est plus utilisé que comme engin de manœuvre.

Locomoteur Ærlikon 1-E-1 de 2500 chevaux. — A la suite des

essais du locomoteur C + C, la Compagnie des Alpes Bernoises a commandé aux Ateliers Öerlikon (qui partagèrent la commande avec la maison Brown-Boveri), douze locomoteurs nouveaux susceptibles de développer au crochet, pendant 1 heure et demie, un effort de 10 tonnes, à la vitesse de 50 km : h au lieu de 40 km : h pour le locomoteur précédent.

Le locomoteur (*fig. 14*) comporte 5 essieux-moteurs, avec roues de 1,35 m et deux essieux porteurs avec roues de 0,85 m.

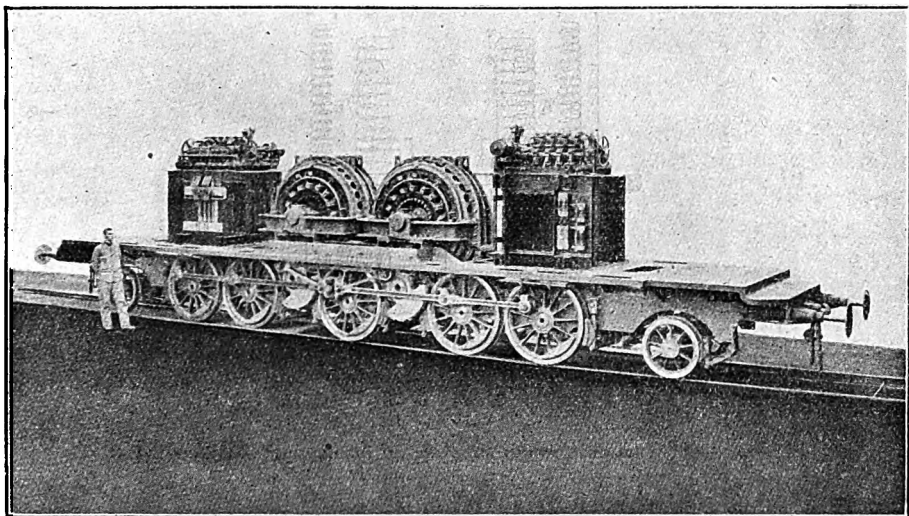


Fig. 14. — Châssis d'un locomoteur 1-E-1 avec moteurs et transformateurs.

Deux moteurs, à grande vitesse, de 1250 chevaux attaquent par engrenages à doubles chevrons, de rapport de réduction 1 : 2,23, deux faux essieux placés exactement au-dessous, des deux côtés de l'essieu moteur central. Des faux essieux, le mouvement est transmis à l'essieu central par bielle triangulaire à glissière verticale et aux autres essieux par des bielles d'accouplement.

L'essieu central a un jeu latéral de 25 mm, les deux essieux médians sont sans jeu et les deux essieux moteurs extrêmes qui forment bogie du type Krauss-Winterthür avec l'essieu porteur, ont un jeu latéral de 40 mm, tandis que le pivot du bogie peut lui-même prendre un déplacement de 78 mm par rapport au centre et l'essieu porteur un jeu latéral de 115 mm. Cette disposition s'est montrée excellente pour le passage dans des courbes descendant à 115 m de rayon.

A la suite de l'usure rapide des paliers, sous l'action des chocs

due aux forces d'inertie des masses très lourdes constituées par les bielles triangulaires, on a intercalé, en 1914, un élément élastique dans la jante de l'engrenage, en disposant entre le croissillon claveté sur l'arbre et la jante seize paquets de six lames de ressorts, sensiblement radiales, ce qui a eu pour résultat de réduire au huitième l'usure des paliers et de supprimer les vibrations.

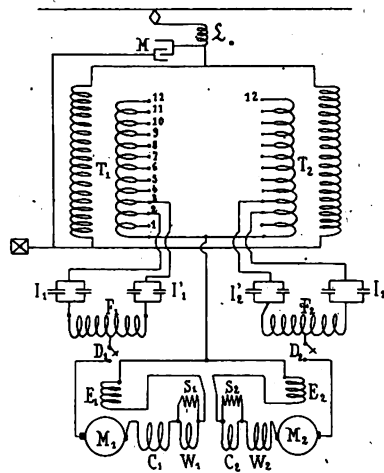


Fig. 15. — Schéma de traction simplifié du locomoteur Öerlikon 1-E-1.

Le poids total est 107 tonnes, soit 42,8 kg par cheval de 1 heure et demie, et le poids adhérent 80 tonnes, ou 16 tonnes par essieu-moteur. L'effort à la jante correspondant à la puissance de 2500 chevaux est 13,5 tonnes à 50 km : h et l'effort maximum au démarrage 18 tonnes; la vitesse maximum est 75 km : h.

L'équipement électrique est protégé contre la foudre et les surtensions par une bobine de self en série; un condensateur Moscieki avait été primitivement placé en dérivation au rail, immédiatement après la self, mais il a été enlevé par la suite, à cause des incidents qu'il occasionnait. Le schéma de traction simplifié est donné dans la figure 15.

De chaque côté des moteurs sont placés deux transformateurs T_1 et T_2 refroidis chacun par un ventilateur séparé et portant 12 prises de courant qui permettent d'obtenir 12 échelons de tension d'environ 45 volts, de 90 volts à 520 volts; les moteurs absorbent, en pleine charge, 3000 ampères chacun, sous 420 volts. Chaque transformateur peut être, en cas de besoin, utilisé séparément, mais les deux moteurs fonctionnent toujours ensemble (la transmission

mécanique serait très mauvaise avec un seul moteur agissant sur la bielle triangulaire).

La commande des prises de courant se fait ici, non plus au moyen de contacteurs, comme dans les locomoteurs du Midi, mais par un combinateur monté directement sur chaque transformateur et actionné par un servo-moteur électrique.

Ce combinateur (*fig. 16*), supprimé sur le schéma, pour éviter toute complication, se compose d'un cylindre principal effectuant

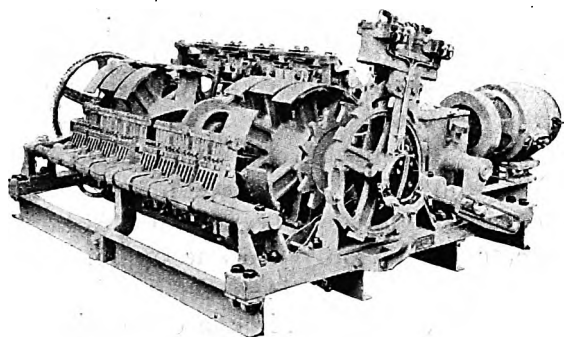


Fig. 16. — Contrôleur actionné par servo-moteur dans le locomoteur 1-E-1.

les connexions convenables, avec liaison à une paire de bobines préventives F_1 et F_2 , et d'un cylindre auxiliaire assurant, au moyen des interrupteurs I à soufflage magnétique, la fermeture ou la coupure de l'une ou l'autre des deux bobines préventives, de telle façon que les prises ou cessations de contact se fassent sans courant sur le cylindre principal. Le servo-moteur comprend un moteur à courant continu, actionnant un mécanisme à cliquets suivant un mouvement pendulaire; les cliquets sont manœuvrés par des électro-aimants excités par le contrôleur principal et provoquant la rotation du cylindre dans un sens ou dans l'autre. Les contacts principaux sont établis pour l'intensité maximum de 3600 ampères, et sont rendus très accessibles pour faciliter le remplacement.

Les moteurs série compensés du type Behn Eschenburg, dont la théorie sommaire a été donnée plus haut, pèsent 14 tonnes, avec leurs engrenages, pour une puissance de 1250 chevaux pendant 1 heure et demie. Ils absorbent à leur puissance maximum un courant de 3000 ampères environ sous 430 volts, avec un facteur de puissance atteignant 0,95 aux vitesses normales. Ils comportent 16 pôles et à la fréquence 15 ont une vitesse de synchronisme de 112,5 t : m, tandis que la vitesse de marche correspondant à

50 km : h est 440 t : m, soit presque quatre fois la vitesse du synchronisme. Ouverts librement, ils se ventilent eux-mêmes et l'air chaud produit dans la cabine est évacué par un ventilateur de toit de 5 chevaux susceptible de débiter à l'extérieur 600 m³ d'air par minute.

Le changement de sens de marche se fait par des inverseurs agissant sur l'enroulement d'excitation E; ces inverseurs sont placés sur les moteurs et actionnés par des solénoïdes à courant continu; ils ne sont pas représentés sur le schéma.

Le chauffage des trains locaux se fait sous la tension de 325 volts (puissance maximum 100 kw); les trains internationaux sont chauffés à la vapeur, au moyen d'un fourgon spécial. Les compresseurs d'air et les autres appareils moteurs sont actionnés à 118 volts; un groupe transformateur, en parallèle avec quatre batteries d'éclairage, fournit le courant continu nécessaire au contrôle du locomoteur, suivant le système à unités multiples.

La commande se fait au moyen d'une manette accessoire pour le changement de marche et d'une manivelle principale, à 13 crans, actionnant les combineurs de réglage de tension. Ces combineurs peuvent, en cas de besoin, être manœuvrés à main; ils portent une roue avec des numéros visibles du mécanicien, lui indiquant sur quel cran se trouve réellement le combineur et lui permettant ainsi de contrôler la bonne marche de l'appareil.

Le locomoteur est muni d'un freinage Westinghouse double, comprenant le frein direct modérable et le frein automatique, mais il ne comporte aucun mode de freinage électrique, ni avec récupération, ni avec charge sur résistances.

Influence sur les lignes télégraphiques et téléphoniques. — Les dispositions suivantes ont été prises en ce qui concerne les lignes à courant faible.

De Thoun à Spiez, les lignes du chemin de fer sont sous câbles: celles des P.T.T., toutes à double fil, même pour le télégraphe, ont été écartées au moins à 50 m; l'exploitation est bonne.

De Spiez à Frutigen (14 km), les lignes des deux administrations, toujours à double fil, s'approchent quelquefois à 10 m; il en résulte un peu de friture dans les lignes téléphoniques. De Frutigen à Kandergrund, il n'y a pas de lignes des P.T.T., et les lignes du chemin de fer ont été écartées.

De Kandergrund à Ausserberg, les lignes du chemin de fer sont en câbles. Les câbles sont enterrés en dehors des tunnels et en canalisation faite avec des fers zorés dans les tunnels.

Dans le grand tunnel, les lignes fédérales sont en câbles et ces câbles sont placés dans des fers zorés, occupant l'autre côté du tunnel.

Les chemises de plomb des câbles sont reliées électriquement aux boîtes de jonction, et les boîtes de jonction aux rails : dans les parties enterrées, les boîtes de jonction sont à découvert et, pour les lignes fédérales, placées dans des petits puits de visite.

Au delà d'Ausserberg vers Brigue, les lignes redeviennent aériennes, et celles des P.T.T. s'écartent à grande distance de l'autre côté du Rhône.

En résumé, la solution protectrice adoptée a été ou d'écarter les lignes avec suppression du retour par la terre, ou de les mettre sous câbles.

Entretien des locomoteurs 1-E-1. — Tous les jours, à chaque fin de course, une équipe composée de quatre hommes (un monteur et trois aides) visite la partie électrique, spécialement les combinateurs, et, s'il est besoin, gratte les bavochures sur les contacts.

Tous les mois, on procède, au dépôt, à la visite et au réglage des paliers des faux essieux, ce qui demande quelques heures.

Tous les quatre mois, une journée entière est consacrée à la visite détaillée des combinateurs.

Tous les ans, on règle les paliers des essieux, et rectifie les collecteurs (10 à 15 jours).

Enfin tous les trois ans, on exécute la revision générale, avec enlèvement et démontage de tous les organes, sauf la caisse (moteurs, transformateurs, appareils divers, essieux et faux-arbres, etc.) : cette opération immobilise la machine six semaines à deux mois.

L'entretien est effectué d'une façon très soignée, ce qui est sûrement une des raisons de la bonne marche de l'exploitation.

Le parc comprend un locomoteur C + C, 13 locomoteurs 1-E-1, 3 automotrices de 450 chevaux, et 12 locomotives à vapeur, et occupe 65 ouvriers; chaque locomoteur fonctionne avec trois équipes.

Résultats obtenus dans l'exploitation monophasée de Laetschberg.
— La ligne du Laetschberg ayant été exploitée électriquement dès le début, il ne peut être question de comparaison avec la traction à vapeur. D'autre part, la mise en service a été suivie presque aussitôt de la guerre et il n'y a eu que peu de temps d'exploitation normale. On ne peut, dans ces conditions, tirer du Laetschberg des

renseignements économiques probants sur la valeur du système monophasé, cette ligne servant encore aux constructeurs de champ d'essais pour l'électrification des autres chemins de fer suisses.

On peut cependant constater que le fonctionnement technique a été excellent, après une période de tâtonnements de quelques mois pour la réalisation d'une isolation suffisante des lignes et des transformateurs, sous la tension élevée de 15 000 volts. L'entretien des machines, fait avec grand soin, semble plus coûteux que dans le système triphasé, environ le double; l'emploi exclusif de locomoteurs d'un fort tonnage, même pour des trains à charge réduite, peut-être aussi l'absence de récupération, entraîne un rendement de traction relativement faible.

Si l'on joint à cette infériorité économique l'absence de freinage électrique, on peut conclure que le système monophasé, même sous la forme employée au Lötschberg, la plus moderne actuellement, et malgré un bon fonctionnement technique, n'a pas atteint encore un degré de mise au point comparable au système triphasé.

ELECTRIFICATION DES CHEMINS DE FER FÉDÉRAUX SUISSES ET PARTICULIÈREMENT DE LA LIGNE DU GOTHARD.

Dès 1902 avait été créé en Suisse un Comité d'Études, chargé de préciser les conditions techniques et financières propres à réaliser l'introduction de la traction électrique sur les chemins de fer suisses.

Dans une première Communication en 1906, la Commission d'Études insistait sur le fait que l'importance capitale de la question de l'électrification des chemins de fer suisses n'est pas due surtout aux avantages techniques de la traction électrique, mais bien plutôt au fait qu'elle permettra la mise en valeur des forces hydrauliques du pays et leur substitution à la houille, pour laquelle la Suisse est entièrement tributaire de l'étranger.

Dans des communications successives, n° 2 et n° 3 en 1908, la Commission établit ensuite le choix du système de traction (monophasé à 15 périodes et 15 000 volts) et les normes et principes d'un service de traction; dans une dernière brochure n° 4, parue en 1913, elle résuma les Communications précédentes, établit le devis d'électrification de l'ancienne ligne du Gothard et du 2^e arrondissement des Chemins de fer fédéraux (C. F. F.), et détermina l'énergie nécessaire pour la traction hydroélectrique de tous les chemins de fer suisses.

En même temps, la Direction générale des C. F. F. s'occupait d'étudier, en premier lieu, l'électrification du tronçon Erstfeld-Bellinzona de la ligne du Gotthard. Dans un rapport du 9 août 1913, elle préconisait la production de l'énergie par l'Administration elle-même, et le 23 août suivant, elle demandait pour l'installation de la traction électrique sur le tronçon d'Erstfeld à Bellinzona (109,3 km), un crédit de 38,5 millions, comprenant l'établissement de deux centrales (Ritom et Amsteg), mais non l'acquisition du matériel tracteur : le crédit fut voté le 25 novembre 1913.

Pendant cette année 1913, l'exploitation électrique avait été mise en service au Lötschberg, et, comme il a été relaté plus haut, un grand nombre d'interruptions se produisirent, spécialement dues aux ruptures d'isolateurs, aux crevaisons de transformateurs, et aux échauffements de paliers, interruptions auxquelles on arriva à remédier complètement, mais seulement au bout d'un assez long délai.

Sous l'influence de ces difficultés d'exploitation, la Direction des C. F. F., dans ce Rapport du 23 août 1913, où elle demandait le crédit nécessaire à l'électrification du Gotthard, sans contester l'opinion de la Commission, refusait de se prononcer définitivement sur le choix du système, préférant attendre que l'état des travaux l'obligeât à prendre une décision.

La guerre, survenue en août 1914, en restreignant l'importation de charbon en Suisse, a obligé le pays à pousser activement les travaux d'électrification et à prendre une décision sur le choix du système à adopter.

Dans son Rapport du 12 janvier 1916, la Direction des C. F. F. propose l'adoption définitive du système monophasé à 15 périodes : l'expérience du Lötschberg lui paraît satisfaisante, étant donné la façon avec laquelle ont été exécutés les importants transports qui ont précédé l'entrée en guerre de l'Italie; l'état de guerre l'oblige à recourir à un système tel que les constructeurs nationaux soient en mesure de fabriquer rapidement et sûrement les locomoteurs correspondants. Le triphasé est laissé de côté, à cause de son manque de souplesse et de sa ligne bipolaire. En ce qui concerne le courant continu à haute tension, la seule ligne en fonctionnement Butte à Anaconda (2400 volts, 41 km), dans l'État de Montana (États-Unis d'Amérique), donne d'excellents résultats, mais c'est une ligne d'intérêt local à gros trafic d'un caractère spécial. Le seul point de comparaison sérieux est celui du Chicago Milwaukee Saint-Paul, dont les expériences commencent seulement à cette date.

Le Rapport ajoute : « Il faut reconnaître que les cas cités d'application du courant continu à haute tension, qui sont surtout tirés d'Amérique, et les expériences faites jusqu'ici avec ce système, permettent d'espérer que, dans un avenir pas très éloigné, celui-ci sera bien près de valoir le système du courant monophasé. Si nous n'avions pas ce dernier système à notre disposition, nous pourrions recommander de tenter un essai avec le courant continu, en l'appliquant avec prudence sur un parcours qui ne soit pas trop long. Nous estimons que cela ne serait point téméraire, mais il faudrait ajourner jusqu'à nouvel ordre l'équipement de la ligne du Gotthard... ».

En résumé, la Suisse a adopté définitivement le système monophasé, pour lequel d'ailleurs ses techniciens dirigeants ont toujours eu une préférence marquée, sous la poussée des événements de la guerre, obligée qu'elle était de procéder, au plus tôt, à la réalisation de son programme, et d'établir son choix en tenant compte de la possibilité d'exécution par ses constructeurs.

Renseignements généraux de traction sur la ligne du Gotthard. —

La ligne du Gotthard, entièrement à double voie, comporte sur les 109,3 km du tronçon Erstfeld-Bellinzona, en allant du Nord au Sud, d'Erstfeld à Göschenen, 28,88 km dont 18,26 km en rampe de 25 mm et 26 mm, de Göschenen à Airolo, 15,74 km, dont 15 km du grand tunnel, avec déclivité maximum de 6 mm, d'Airolo à Biasca, 45,88 km dont 22,55 km en pente de 25 mm à 27 mm, et enfin de Biasca à Bellinzona, 19,10 km avec déclivité maximum de 8 mm.

De Lucerne à Chiasso, la longueur totale est 225,10 km, comportant les tronçons Lucerne-Erstfeld, 60,52 km, avec déclivité maximum 10 mm, et Bellinzona-Chiasso, 55,28 km, avec rampe et descente de 25 mm à 26 mm, sur longueur de 3,9 km dans chaque sens.

Les trains normaux prévus sont :

Voyageurs omnibus 300 tonnes remorquées, à 50 km : h, en rampe de 26 mm;

Marchandises, 430 tonnes remorquées, à 35 km : h, en rampe de 26 mm, avec une seule machine;

Marchandises, 860 tonnes remorquées, à 35 km : h, en rampe de 26 mm, avec deux machines.

Le service de la Traction des C.F.F. suisses cherche à éviter l'emploi de la traction symétrique à cause des difficultés de mise

d'un locomoteur en queue et de descente en traction symétrique, et dans cette idée, il n'hésite pas à préconiser l'utilisation d'efforts de traction plus grands qu'en France, bien que l'accouplement utilisé soit le même. Il prévoit des efforts de traction de 12,5 tonnes en marche normale, et même de 15 tonnes, estimant que le danger de rupture d'attelages provient des à-coups plutôt que de la grandeur de l'effort exercé par la machine. Pour cette raison, la charge maximum remorquée par train est limitée rigoureusement à 1000 tonnes; on compte d'ailleurs employer le plus couramment des trains de marchandises d'environ 800 tonnes.

On a fait des essais pour remorquer en double traction accouplée (avec efforts de 15 tonnes) des trains de 500 tonnes en rampe de 26 mm, et de 1000 tonnes en rampe de 12 mm (à des vitesses de 20 à 25 km : h).

La Direction des C.F.F. cherche également à augmenter la charge admise par essieu-moteur, en renforçant un certain nombre de ses ponts pour qu'ils puissent supporter deux locomoteurs consécutifs, avec des essieux chargés à 20 tonnes et écartés de 2 m et une charge de 7 tonnes par mètre courant, et en établissant ses nouveaux ouvrages d'art pour des charges plus grandes encore, savoir 1 train de locomoteurs, 4 essieux chargés à 25 tonnes avec écartement de 1,50 m et 11 tonnes par mètre courant. Les rails sont de 45 kg, avec traverses à 66 cm de distance.

Ligne de contact. — La ligne de contact sera à isolement double partout, sauf dans les tunnels où seront employés de très gros isolateurs. Elle sera à suspension *caténaire double autocompensatrice*, d'un modèle spécial. L'auto-compensation est obtenue de la manière suivante : Tous les 440 m, le fil auxiliaire et le fil de contact s'interchangent; la plus grande distance de deux points fixes de suspension est 3,5 km, la demi-distance de deux stations. Sur une portée de 55 m, un allongement du fil de contact de 2 mm provoque une variation de tension de 400 kg à 200 kg; le même allongement, sur le fil auxiliaire beaucoup moins tendu, ne fait varier la tension que de 380 kg à 400 kg; avec la disposition alternante du fil auxiliaire et du fil de contact, l'allongement se répartit sur les deux sortes de fils, et la tension ne varie plus que d'une quantité assez faible, pour des écarts de température de 50° à 60°.

Le fil de contact est en cuivre de 105 mm², le câble porteur en 7 brins 40/10 en fer, et le fil auxiliaire en acier de 93 mm².

La tension électrique sera 7500 volts pendant l'exploitation mixte et 15000 volts, quand la traction à vapeur sera supprimée

(à cause du danger de court-circuit par la fumée dans les tunnels).

De Lucerne à Chiasso, il y aura six sous-stations, dont deux situées aux Centrales mêmes de Ritom et Amsteg; le courant sera amené aux sous-stations à 2×30000 volts.

Après essais, on a adopté, pour la ligne de contact, des poteaux en profilés Differdange n^{os} 27 et 28, et des pylônes en treillis aux stations; pour les traversées à cinq voies, des fermes transversales à la Polonceau. Les poteaux en béton armé n'ont pas été adoptés, parce qu'ils sont trop difficiles à transporter et à débarquer (sans entraver l'exploitation) et qu'ils coûtent aussi cher que des poteaux fer repeints trois fois en dix ans ou que des poteaux bois remplacés tous les dix ans.

Locomoteurs : Question de la récupération. — En vue de l'exploitation électrique du Gotthard, ont été commandés, par moitié aux deux constructeurs Œrlikon et Brown-Boveri, quatre machines d'essais de types différents, et vingt locomoteurs de deux types.

Toutes ces machines diffèrent notablement des locomoteurs 1-E-1 du Lötschberg, et sauf pour l'une des machines d'essais, elles doivent comporter, soit le freinage rhéostatique, soit la récupération.

L'exploitation du Lötschberg a montré qu'il y avait à utiliser des locomoteurs sans freinage électrique, l'inconvénient de l'envahissement des poussières métalliques provenant du freinage mécanique et la Direction des C. F. F. a demandé que les nouveaux locomoteurs puissent freiner électriquement au moins leur propre poids, soit par récupération, soit par freinage rhéostatique.

Indépendamment de la perte d'énergie correspondante, le freinage rhéostatique présente l'inconvénient d'exiger des résistances dont le poids déjà élevé pour le freinage du locomoteur seul (environ 3 tonnes), devient prohibitif si l'on envisage le freinage électrique du train entier (10 tonnes); seule, la récupération permettra ce freinage électrique du train entier.

Là se présente une difficulté grave du monophasé : nous ne connaissons aucun système de récupération monophasé qui jusqu'ici ait donné des résultats satisfaisants. Les ateliers Œrlikon essayent en ce moment l'application d'un système, dû au Dr Behn-Eschenburg (*fig. 17*) ⁽¹⁾.

Le moteur fonctionne comme génératrice excitée en dérivation sur la portion OA du transformateur, et pour obtenir une tension

(1) Voir *Génie civil*, 2 novembre 1918.

résultante sensiblement en phase avec la tension du réseau, on intercale en série avec l'induit M et l'enroulement compensateur une grosse bobine de self-induction L.

Le réglage se fait à la fois au moyen d'interrupteurs permettant de donner trois valeurs différentes à l'excitation OA et avec le combinateur principal qui fait varier la tension AB appliquée à l'ensemble de l'induit et de la bobine de réactance.

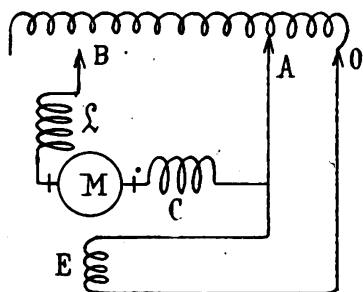


Fig. 17. — Schéma de montage en récupération Behn-Eschenburg.

Les essais sur locomoteurs n'avaient pas encore eu lieu à la date de notre visite (fin janvier dernier).

Nous n'insisterons pas davantage sur les locomoteurs destinés au Gotthard, aucun d'entre eux n'ayant encore effectué ses essais de fonctionnement ⁽¹⁾.

Puissance et énergie nécessaires. — Dans son rapport du 23 août 1913, la Direction des C. F. F. avait prévu, en admettant une augmentation de trafic de 35 pour 100 de 1911 à 1918, que l'exploitation électrique, susceptible d'être mise en service en 1918, sur le tronçon Erstfeld-Bellinzona, demanderait aux usines, une puissance moyenne de 6550 chevaux et maximum de 19000 chevaux, pour un trafic journalier moyen de 2,27 MTkm.

Mode de production de l'énergie. — La Direction des C. F. F. a décidé de produire elle-même, dans des usines d'Etat, toute l'énergie dont elle aura besoin pour la traction électrique, directement en courant monophasé, à 15 périodes. Elle s'est basée, à ce sujet, sur les raisons suivantes :

1° La gestion par les Chemins de fer des usines génératrices donne

(1) Voir à ce sujet, Hugo STUDER, *Génie civil*, 15 juin 1918.

les meilleures garanties pour le bon fonctionnement de ces usines, qui sont l'installation capitale du chemin de fer électrique, le personnel de ces usines étant soumis aux mêmes règles disciplinaires que celui du chemin de fer.

2° « Les gros sacrifices qu'a exigés la nationalisation des chemins de fer devraient enlever toute tentation de remettre aux mains de l'industrie privée de parcelles installations servant à la collectivité (les Centrales) ».

3° Le prix de revient de l'énergie ne sera pas plus élevé dans des usines d'Etat que dans des usines privées, étant donné surtout que la principale dépense consiste dans l'intérêt du capital engagé et que l'Etat emprunte à des taux plus faibles que les particuliers.

De même qu'en Italie, la Direction des C. F. F., suivant en cela d'ailleurs l'opinion de la Commission d'Etudes, a estimé nécessaire de produire l'énergie de traction directement sous sa forme d'utilisation en monophasé 15 périodes, pour éviter la transformation rotative, très onéreuse comme installation et comme rendement. Cette dernière décision a soulevé en Suisse de très vives discussions, un certain nombre de techniciens et d'industriels demandant l'unification, dans toutes les Centrales, des conditions de production de l'énergie (courants triphasés, à une fréquence déterminée).

La tension des alternateurs monophasés à 15 périodes sera de 8000 volts et, dans la période de début, la ligne de contact sera alimentée directement sur la rampe nord. Dans l'exploitation définitive, la tension sera élevée à $2 \times 30\,000$ volts (60 000 volts, avec milieu des transformateurs à la terre).

La transmission de l'énergie sera faite par paires de câbles de 30000 volts (essayés à 120000 volts), de 135 et de 120 mm² de section, posés dans des caniveaux en béton, le long de la voie (mais coupant les boucles), entre Amsteg et Ritom, et de Ritom jusqu'à Giornico (au sud); de Giornico vers Chiasso, la ligne sera aérienne. Les câbles sont sous plomb, sans armature en fer; les boîtes de jonction, en fer, sont réunies électriquement à la chemise de plomb, et ne sont jamais enterrées.

Vu la difficulté de se procurer des matières premières, la Direction a arrêté les travaux de l'usine d'Amsteg et concentré ses efforts sur l'usine de Ritom.

Protection des lignes télégraphiques et téléphoniques. — Au Gotthard, les lignes à courant faible seront mises sous câbles à chemise de plomb, placés dans les tunnels du côté opposé aux

câbles à 30000 volts, enterrés le long de la voie en dehors des tunnels, avec boîtes de jonction à découvert, reliées électriquement à la chemise de plomb, comme il a été fait au Loetschberg.

Résultats économiques de l'électrification. — La Direction des C. F. F. ne semble pas escompter de l'emploi de l'électricité une réduction des dépenses d'exploitation par rapport à la vapeur, et elle paraît même s'attendre à ce que la traction électrique soit, dans l'ensemble, un peu plus chère. « Toutefois l'électrification s'impose, d'abord en vue de la suppression de la dépense de charbon, toute entière payée à l'étranger, ensuite en raison d'un certain nombre d'avantages accessoires (suppression de la fumée importante à cause des nombreux tunnels, augmentation de la vitesse des trains omnibus et du poids des trains de marchandises et en somme de la capacité des lignes).

Les locomoteurs électriques ne feront peut-être pas beaucoup plus de parcours que les locomotives à vapeur (certains mécaniciens ont fait jusqu'à 70000 km dans un an avec leurs locomotives), mais ils traîneront des trains plus lourds à une plus grande vitesse.

(A suivre.)



CORRESPONDANCE.

Paris, le 14 mars 1919.

A Monsieur Larnaudé, président de la Société française
des Electriciens (12, rue de Staël, Paris).

MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

Je prends la liberté de vous adresser quelques remarques faites à la lecture, dans le dernier *Bulletin*, de la Communication de M. Féry à laquelle je n'ai pas assisté.

En ce qui concerne les réactions de la positive, je crois qu'on peut considérer comme démontré le fait nouveau et très intéressant que la décharge pratique des plaques est limitée à la formation du peroxyde de plomb $Pb\ O^2$.

Ce qui ne paraît pas conciliable avec les faits connus, c'est l'opinion émise par M. Féry, qu'il n'y a jamais formation de sulfate de plomb $SO^1\ Pb$ pendant la décharge normale de l'élément.

Il y a lieu de rappeler d'abord que l'électrolyse des sels métalliques au minimum s'opère, suivant une règle générale, par un dépôt de peroxyde au pôle positif et par un dépôt de métal au pôle négatif; leur réaction électrolytique est donc nettement différente des sels au maximum.

Or les sels de plomb, dont on ne connaît pratiquement qu'une série de sels, se comportent à la manière des sels au minimum : les solutions aqueuses d'acétate, chlorure et nitrate de plomb sont décomposées par le courant en donnant $Pb\ O^2$ au pôle positif et Pb au pôle négatif, comme les sels au minimum de bismuth, cobalt, cuivre, manganèse, etc., sous réserve naturellement des réactions chimiques secondaires qui peuvent varier suivant les milieux.

Il résulte de ces faits connus que les sels de plomb dérivant de $Pb\ O$ sont des sels au minimum et que $SO^2\ Pb$ est le *sulfate plombeux*; d'ailleurs, un sulfate plombique $(SO^4)^2\ Pb$, facilement décomposable par l'eau, a été signalé par Elbs et il correspond à $Pb\ O^2$ qui serait alors l'oxyde plombique.

D'autre part, j'ai signalé (*Eclairage électrique*, 3 septembre 1904), en me basant tant sur des faits déjà connus que sur mes nombreuses expériences personnelles, qu'il n'y avait pas de décharge possible à tirer d'un accumulateur au plomb, si l'électrolyte ne contenait $SO^4\ Pb$ dissous et qu'on augmentait le rendement des décharges en augmentant la quantité de sulfate de plomb dissous.

Il est donc indispensable qu'il y ait formation de sulfate de plomb dans l'accumulateur et il me paraît probable que le sulfate $SO^4\ Pb^2$ signalé par M. Féry n'est qu'un mélange très intime de plomb spongieux et de sulfate $SO^4\ Pb$.

Veuillez agréer, Monsieur le Président, l'assurance de ma considération très distinguée.

Paul BARY.

D'autre part, M. Ch. Féry, à qui la précédente lettre a été communiquée, nous a adressé la réponse suivante :

Paris, le 24 mars 1919.

MONSIEUR ET CHER COLLÈGUE,

I. J'ai été très heureux de recevoir la lettre de M. P. Bary, que vous avez bien voulu me communiquer, et que je vous retourne ci-jointe; elle me permettra, si vous le voulez bien, de présenter à nos collègues une expérience toute récente qui vient appuyer mon hypothèse de la formation de sulfate plombé pendant la décharge normale.

J'ai monté un élément constitué par une masse de plomb réduit occupant le fond d'un vase en verre, et une positive verticale. J'ai déjà parlé de ce dispositif dans ma Communication; il permet de suivre facilement les changements de teinte dans la masse de la matière négative. La négative avait été prise intentionnellement très insuffisante, de manière à pouvoir la sulfater complètement.

Cet élément a été d'abord déchargé sur une résistance de 16 ohms; je prenais de temps à autre le voltage à circuit ouvert, afin de connaître sa résistance intérieure.

Cette résistance a varié de 1 à 4 ohms, dans les 20 premières heures de la décharge, et cela d'une façon très régulière. Le crochet final a été très brusque pour les raisons que j'ai données dans ma Communication (*Bulletin de la Société des Électriciens*, 3^e série, t. IX, 1919, n^o 77).

En 2 heures en fin de décharge, la résistance est passée de 4 à 43 ohms. A ce moment, j'ai continué à faire débiter cet élément sur une résistance de 327 ohms pendant 15 jours. Au bout de ce temps la résistance intérieure atteignait 130 ohms.

En construisant la courbe de la résistance intérieure en fonction des ampères-heure débités, on obtient deux droites avec une brisure très nette, correspondant au crochet de la décharge normale.

La capacité obtenue pendant la décharge normale a été de 2, 3 ampères-heure, elle a entraîné une augmentation de résistance de 3 ohms. Coefficient angulaire de la première droite $\frac{3\omega}{2,3 \text{ AH}} = 1^{\omega} 3$ par ampère-heure.

La capacité de la décharge supplémentaire a été de 1,77 ampère-heure, avec une augmentation de résistance intérieure de $130 - 4 = 126$ ohms. Coefficient angulaire $\frac{126\omega}{1,77 \text{ AH}} = 71^{\omega}$ par ampère-heure.

Ces résultats s'expliquent très aisément si l'on se rappelle que la première décharge, celle normale, est due à la transformation du plomb métallique en sulfate plombé $\text{SO}^+ \text{Pb}^2$ bon conducteur.

La seconde décharge est due à la transformation de ce sulfate plombé en sulfate normal $\text{SO}^+ \text{Pb}$ qui est très isolant.

J'ajoute enfin que la matière négative est passée dans la première décharge du gris clair du plomb réduit à un gris très foncé.

Pendant la seconde décharge, la teinte s'est à nouveau éclaircie par suite de la présence de sulfate blanc dans la masse de sulfate plombé qui est très foncée.

L'hypothèse d'un mélange de plomb et $\text{SO}^+ \text{Pb}$ ne cadre pas avec cette expérience.

II. Je sais que M. P. Bary attribue un rôle prépondérant à la présence du sulfate $\text{SO}^+ \text{Pb}$

qui est dissous dans l'acide de l'accumulateur. Il a travaillé autrefois cette question à mon laboratoire.

Le liquide des accumulateurs est en effet toujours saturé de ce sel, ce qui s'explique très bien. Mais il n'en est certainement pas de même dans les pores de la négative.

Pour bien me faire comprendre, je vais prendre un exemple où les sels au maximum et au minimum n'ont pas la même couleur : Versons une solution de chlorure ferrique dans un vase renfermant une couche de limaille de fer au fond. Il est bien certain que le liquide supérieur restera teinté en rouge orangé, tandis que celui interposé entre les grains de limaille prendra la teinte vert clair des sels ferreux. C'est, à mon avis, ce qui se passe dans l'accumulateur au plomb. Le liquide libre de l'élément, d'ailleurs en contact avec les positives très oxydantes, ne peut contenir que $\text{SO}_4 \text{ Pb}$, cela ne fait aucun doute.

Mais, à mon avis, ce sel n'intervient pas dans les phénomènes de décharge où il ne pourrait qu'être nuisible comme le sulfate de zinc de la pile de Volta épuisée ⁽¹⁾.

La véritable réaction qui fournit, sans aucun doute, l'énergie de la décharge, est celle de l'acide sur la négative, comme cela a lieu dans toutes les piles.

Je serais très heureux, comme vous même, si la publication de la lettre de M. P. BARY et de la présente, pouvait amorcer une discussion sur ces sujets si intéressants.

Veuillez agréer, je vous prie, mon cher Collègue, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Ch. FÉRY.

IL Y A TRENTE ANS.

Avril 1889. — Description du service horaire de la ville de Lyon, par M. Ch. ANDRÉ.

(¹) M. Bellini, dans une intéressante communication : *Contribution à l'étude des piles électriques* (*Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, 3^e série, t. V, n° 39, 1915), a précisément attiré l'attention sur ce point.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 30 FR. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. . . 32¹FR.

Prix du numéro : 3 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de poste.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS,

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

Ce Recueil paraît chaque mois.]

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits.

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine) et à LYON.

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

Pour la *Commande de :*

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines
installées en France
par la **Compagnie Electro-Mécanique**
et ses Licenciés,

plus de 1.200.000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Stations Centrales.

Transports de Force.

**Traction électrique par courant
continu et par courant alternatif.**

Éclairage électrique des trains.

**Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.**

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminiers.

**Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.**

Compensateurs de phase.

Commuatrices.

ACCUMULATEURS ELECTRIQUES

FULMEN

Bureaux et Usine : à CLICHY, 18, Quai de Clichy.

FILS ET CABLES

POUR L'ÉLECTRICITÉ

R. ALLIOT & ROL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

38, rue de Reuilly. 38

PARIS

TÉLÉPHONE

CABLERIE DE JEUMONT

TUBES

ISOLATEURS

ISOLANTS MOULÉS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 7 mai 1919, p. 307. Admission de Membres titulaires, p. 308. — Allocution de M. le Président, p. 308. — La grande traction par l'électricité (M. N. Mazon), p. 311. — Les récents progrès de la téléphonie sans fil (M. Gutton), p. 323. — Programme d'électrification partielle des chemins de fer français; expérience actuellement acquise en France et à l'étranger dans l'électrification des grandes lignes (M. Mauduit), p. 333 (*suite et fin*).

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 361.

BIBLIOGRAPHIE, p. 364.

ERRATUM, p. 366.

IL Y A TRENTE ANS, p. 366.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 7 mai 1919 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. N. MAZEN.

La séance est ouverte à 20 h 30 m.

Le procès-verbal de la dernière séance est adopté.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Il est donné connaissance de la demande d'admission suivante :

Loubry (Henri), dessinateur à la Compagnie des Mines d'Aniche, 24, rue Patoux, Aniche (Nord). — Présenté par MM. Boucherot et Paumier.

Ce candidat est élu Membre titulaire de la Société.

M. le PRÉSIDENT. — « Mes chers Collègues, puisque nous avons ce soir la bonne fortune de posséder parmi nous M. le Directeur des Chemins de fer de l'État, M. Le Grain, ainsi que M. le Président des Ingénieurs civils de France, mon collègue et vieil ami, M. Herdner, je suis certain d'être votre interprète en les invitant à venir prendre place au Bureau.

» Ainsi que vous le savez, c'était à notre si éminent ami, M. Devaux-Charbonnel, qu'aurait dû revenir l'honneur de vous présider aujourd'hui. Je n'essaierai pas de rappeler ici tous les titres qu'il avait à la reconnaissance de tous les électriciens. Aussi remarquable fonctionnaire que savant ingénieur, il avait su se créer, tant dans son administration proprement dite qu'au milieu des électriciens, une place de tout premier ordre.

» Les ingénieurs de traction se rappellent l'esprit de méthode qu'il apportait dans ses travaux de recherches sur les perturbations apportées aux télégraphes et aux téléphones par les installations de traction des chemins de fer.

» Vos suffrages unanimes n'avaient fait que consacrer ce que nous savions tous, c'est qu'il possédait non seulement l'estime, mais aussi l'amitié de tous ceux qui, dans sa brillante carrière, l'avaient approché.

» Je pense donc être votre interprète à tous en saluant respectueusement sa mémoire.

» Malgré toute votre peine, vous n'avez pas voulu que notre Société ralentisse, fût-ce un instant, le cours de ses remarquables travaux et vous avez bien voulu me faire le grand honneur de me demander de présider cette année vos réunions.

» Permettez-moi de vous en remercier de tout cœur et de vous demander de m'aider tous dans la grande tâche qui va nous incomber.

» Je m'adresse donc à tous les membres de la Société française des Électriciens pour les prier de venir nous apporter des travaux aussi importants et aussi remarquables que possible. Ces travaux seront le lustre de nos séances et nous permettront de maintenir notre bon renom.

» J'aurais certainement craint cependant que ma tâche ne soit bien lourde, si je ne m'étais, dès mon entrée au milieu de vous, senti soutenu par le brillant état-major que forme votre Bureau et la magnifique assemblée que constitue votre Comité.

» Mais au surplus, ma tâche va encore être facilitée par toute l'œuvre de mon prédécesseur.

» Vous n'êtes pas sans savoir qu'au cours de l'année qui vient de s'écouler, M. Larnaude a brillamment continué l'œuvre si bien commencée par M. Brylinski et a poursuivi toute une série de négociations du plus haut intérêt pour notre Société et pour ses deux filiales, l'École supérieure et le Laboratoire central.

» Notre ancien Président s'est dépensé sans compter et j'oserai dire que là, comme partout, il a laissé l'empreinte d'un véritable administrateur et d'un ingénieur du plus grand talent.

» Son nom restera sur toutes nos lèvres quand il s'agira de la Société.

» Il m'est d'ailleurs bien agréable de constater qu'aussitôt libéré des fonctions dont vous l'aviez chargé, une autre puissante organisation vient de le placer à sa tête.

» Il est des hommes qui n'ont pas le droit de se reposer. Il est de ceux sur lesquels compte le pays.

» Permettez-moi enfin, avant de reprendre le cours de nos travaux, de donner un souvenir ému à ceux qui sont tombés pour la Patrie et de transmettre tous nos vœux à ceux, nombreux encore, qui n'ont pas, jusqu'à présent, pu rejoindre leurs foyers. »

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

LA GRANDE TRACTION PAR L'ÉLECTRICITÉ.

[État actuel de la question (¹).]

M. N. MAZEN. — « Puisqu'il est d'usage que votre Président ouvre chaque année la série des travaux de la Société par une Communication sur le sujet qui lui est le plus familier, vous me permettrez, tout en cherchant à ne pas abuser de vos instants, d'essayer de vous montrer rapidement où en est, en ce moment, cette question si discutée de l'application de l'électricité à la traction sur les grands réseaux de chemins de fer.

» Depuis de longues années déjà, le monde des Ingénieurs et, il faut bien le dire aussi, l'opinion publique se préoccupent de cette application.

» Tout le monde connaît le champ d'action très vaste que l'électricité s'est ouverte tant dans le domaine des tramways que dans celui des métropolitains et des lignes suburbaines et l'on s'étonne un peu du large temps d'arrêt qu'a subi l'élan incontestable de la traction électrique lorsqu'il a été question des applications au domaine des grands réseaux de chemins de fer.

» Il est bien certain que jusqu'à présent, du moins en Europe, à part des exemples qui se rapportent à des cas particuliers ou spéciaux, longs tunnels des lignes internationales, approche des grandes villes, lignes spéciales à profils accidentés, etc., on ne trouve à peu près aucune application qui, réalisée et en service, se soit étendue à un réseau général.

» On cite bien, en Amérique, quelques tronçons relativement importants qui ont commencé à fonctionner, mais ce sont là des cas exceptionnels qui, par leur faible nombre, semblent accuser des difficultés importantes rencontrées au point de vue soit technique, soit économique.

» Voyons tout d'abord comment le problème se pose en général et nous examinerons ensuite les solutions proposées.

» Si nous jetons les yeux sur une carte des chemins de fer de notre pays ou plus généralement sur une carte des chemins de fer de l'Europe centrale et occidentale, nous nous apercevrons tout de

(¹) Durant cette Communication, le fauteuil de la présidence est occupé par M. Gratzmuller, vice-président.

suite que les réseaux forment une sorte de filet à mailles plus ou moins serrées suivant l'importance industrielle et commerciale de la région considérée.

» Ces mailles forment des polygones plus ou moins irréguliers et dont les sommets sont occupés par les gares dites *d'embranchement*.

» Comme il est naturel de prévoir que chaque tronçon de ligne formant un côté de polygone devra, ne fut-ce qu'au point de vue sécurité, être alimenté en énergie à chacune de ses extrémités, c'est-à-dire à chaque gare d'embranchement, on voit de suite que le problème de traction consiste simplement à équiper, suivant les conditions du trafic à assurer, l'un quelconque de ces tronçons de lignes.

» Quant à l'alimentation en énergie du réseau aux gares d'embranchement, au moyen de réseaux à haute tension et d'usines thermiques ou hydrauliques, ce sera une question sortant à peu près complètement du domaine des chemins de fer et de la traction pour devenir un problème de transport de force.

» A vrai dire, on pourrait discuter sur la multiplicité, dans certains cas particuliers, un peu trop grande peut-être pour les régions à mailles très serrées, des points d'alimentation. Mais il ne faut pas oublier que, dans la majorité des cas, nous aurons besoin dans ces gares d'embranchement d'une notable quantité d'énergie à la fois pour l'éclairage et les manutentions, ce qui conduira presque toujours, à l'établissement d'un poste de transformation local qu'il y aura le plus souvent intérêt à utiliser pour la traction soit comme poste de coupure, soit même également comme poste de transformation.

» Les conditions du trafic varient naturellement, non seulement d'un tronçon de ligne à un autre, mais également suivant les saisons et aussi suivant les heures de la journée.

» Sur les tronçons faisant partie des grandes lignes, il sera fort important alors qu'il sera réduit pour les lignes locales.

» La vitesse même des convois, surtout en ce qui concerne les voyageurs, variera également comme on le conçoit facilement.

» Quoi qu'il en soit, on peut ramener à un certain nombre de types la nature même des trains à mettre en circulation.

» Tout d'abord, en ce qui concerne les voyageurs :

» 1^o Les trains à grand parcours s'arrêtant peu fréquemment et marchant à grande vitesse.

» Ces convois contenant souvent des portions de rames internationales, seront pendant longtemps composés de voitures de tous modèles et de toutes provenances.

» Il est nécessaire de prévoir leur remorque par des tracteurs indépendants, ainsi que cela a lieu actuellement avec les locomotives à vapeur.

» Pour eux, se pose le difficile problème du chauffage actuellement effectué à la vapeur par la locomotive.

» 2^o Les trains locaux, directs, semi-directs et omnibus qui peuvent, dans la majorité des cas, être constitués par des automotrices et des remorques.

» Ces trains, de beaucoup les plus nombreux, composent la grande majorité des convois mis en circulation sur les lignes secondaires d'embranchement et constituent une notable partie du trafic voyageurs des grandes lignes.

» Grâce à l'emploi des automotrices mélangées à un certain nombre de remorques, on peut, à l'aide des unités motrices multiples, proportionner à chaque instant l'effort au résultat et obtenir ainsi de l'électricité ce que la vapeur ne permet de réaliser que fort imparfaitement.

» 3^o Les marchandises, dont les vitesses de marche sont plus ralenties.

» Pour ces trains, il faut bien reconnaître que, dans la majorité des cas, la locomotive à vapeur moderne, grâce à sa puissance, permet d'obtenir un effort de traction qui correspond à la limite pratique de résistance de nos attelages européens même renforcés.

» Les Américains, avec leur attelage central très robuste, ont pu aller beaucoup plus loin dans cette voie.

» Dans sa récente et magistrale étude sur la locomotive à vapeur à grande vitesse, M. Herdner nous a montré que, même aux plus hautes vitesses, les ingénieurs hésitaient de moins en moins à augmenter le nombre des essieux accouplés.

» La traction électrique serait donc un utile adjuvant, si elle permettait, comme cela a été envisagé récemment, de répartir la puissance motrice dans le corps du convoi en faisant de la sorte moins travailler les attelages dans les rampes.

» Les essieux moteurs, plus nombreux qu'avec la vapeur, seraient moins chargés chacun, et, plus libres dans leurs allures, ils fatigueraient moins les voies.

» On aurait ainsi résolu le problème, toujours reconnu si diffi-

cile par les ingénieurs qui ont à manier la vapeur, du poussage, de la double et de la triple traction.

» On voit donc d'après tout ce qui vient d'être dit que, en ce qui concerne les voyageurs, la traction électrique montre surtout ses avantages lorsque l'on peut substituer l'automotrice au tracteur et, par les unités motrices à postes de commandes et moteurs multiples, répartir pour ainsi dire l'effort moteur tout le long du convoi, en permettant d'organiser sa réversibilité et sa facile adaptation aux besoins du trafic.

» Il n'est pas besoin d'ajouter qu'une semblable disposition permet les mises en vitesses accélérées et, par suite, l'obtention de temps de transport aussi réduits que possible pour une vitesse de marche déterminée.

» Disons toutefois qu'il ne semble pas que la traction électrique puisse permettre de dépasser les vitesses de pleine marche obtenues avec la vapeur sans l'exécution de lignes spéciales, ainsi que l'ont montré les essais de Zossen.

» Pour les marchandises, la traction électrique ne deviendra vraiment supérieure dans tous les cas à la vapeur que si l'on arrive également à répartir l'effort moteur le long du train pour parer aux limitations de charges imposées par les attelages actuels.

» Le tracé des lignes en sera, dans nombre de cas, facilité, tant en ce qui concerne les rampes admissibles que le tracé en plan, c'est-à-dire les courbes.

» Mais ces avantages divers, intéressants assurément, et auxquels il faudrait ajouter la suppression de la fumée et de tous ses inconvénients, n'empêchent pas que la traction électrique ne pourra être utilement envisagée que si un bilan financier, judicieusement établi, lui donne nettement l'avantage sur la vapeur.

» A ce sujet, il convient de faire entrer largement en ligne de compte, si l'on peut utiliser la bouille blanche, dans les pays qui sont, comme le nôtre, nettement déficitaires en ce qui concerne la production de la houille noire, la diminution ainsi obtenue de l'importation du charbon.

» Revenons maintenant à notre tronçon initial de ligne et examinons quelles sont les solutions qui s'offrent à nous pour l'équiper.

» Il s'agit d'une section dont la longueur pourra varier de 15 à 30 km, alimentée, ainsi que nous l'avons expliqué, par ses deux extrémités.

» Etant donnée cette longueur, l'emploi d'une tension de travail assez élevée s'impose évidemment vu les puissances à mettre en

jeu, et tout de suite se dégagent trois systèmes principaux à envisager :

- » Le courant triphasé,
- » Le courant monophasé,
- » Le courant continu à tension surélevée.

» Mais un examen rapide montre de suite que le triphasé ne saurait être retenu vu la grande complication née de la double ligne aérienne.

» La complexité des installations des fils de travail oblige, en effet, nos voisins les Italiens à interrompre chaque jour pendant un assez long temps le courant sur leurs lignes pour l'entretien. C'est là un vice absolument rédhibitoire pour des lignes à trafic intense.

» Il faudrait ajouter à cela toutes les déféctuosités relatives qu'a le moteur asynchrone par rapport au moteur série au point de vue traction.

» Quelle que soit notre admiration pour ces belles installations dont les Italiens ont eu le mérite de bien fixer la pratique, nous ne saurions nous arrêter à cette solution.

» Le courant monophasé, avec la facilité qu'il apporte de faire fonctionner les moteurs à la tension la plus appropriée et de les alimenter à tension variable tout en laissant à la ligne la faculté de livrer au train du courant à haute tension et cela par simple transformation statique, conduit à un ensemble éminemment robuste et satisfaisant.

» Mais les équipements électriques du matériel roulant sont fort lourds et assez encombrants.

» Cette circonstance, gênante pour les automotrices, l'est en général moins lorsqu'il s'agit des tracteurs qui manquent quelquefois d'adhérence et que l'on est, dans certains cas, conduit à lester.

» Le courant continu, qu'il faut employer à une tension assez élevée sur la ligne pour ne pas arriver à dépenser par trop dans l'établissement de la ligne de travail, mais cependant à une tension suffisamment modérée pour que le fonctionnement des moteurs et leur entretien conduisent à une exploitation pratique, n'a pas permis de dépasser dans les installations réalisées plus de 3000 ou 3500 volts.

» Cette tension est d'ailleurs tout à fait suffisante si l'on considère les longueurs des tronçons de lignes à alimenter et les conditions habituelles du trafic.

» Le courant continu, appliqué directement aux moteurs, trouve sa régulation dans les systèmes séries-parallèles, ce qui, pendant les mises en vitesse, conduit à absorber pas mal d'énergie dans des résistances.

» Dans ce cas, le fonctionnement est théoriquement moins parfait qu'avec le monophasé et lorsqu'un défaut électrique vient à se produire dans les moteurs, il faut craindre les effets destructifs très intenses des grandes différences de potentiel mises en jeu.

» Mais d'un autre côté, les équipements beaucoup plus légers que dans le monophasé peuvent, dans certains cas, fournir une exploitation fort économique.

» A côté de ces systèmes, que j'appellerai *primordiaux*, on trouve également en exploitation un certain nombre de dispositions secondaires.

» Je citerai le système monotriphasé qui consiste à transformer sur la locomotive le monophasé, pris à la ligne de travail, en triphasé, à l'aide d'un groupe tournant. Les moteurs d'essieux sont alors alimentés par ce dernier courant.

» Un autre système, suivant le procédé de Ward Leonard, transforme également par groupe tournant monté sur le tracteur, le monophasé ou le continu de la ligne en continu à tension variable à l'aide duquel on alimentera les moteurs d'essieux.

» Enfin, on sait que nos collègues, MM. Auvert et Ferrand, ont essayé un système qui utilise dans les moteurs d'essieux un courant quasi continu à tension variable, obtenu par redressement du monophasé pris à la ligne et réglage convenable.

» Ce sont là des systèmes fort complexes qui ne sont pas applicables sur les automotrices, vu l'encombrement des groupes tournants et dont la pratique est encore assez peu fixée.

» De cet ensemble de considérations, se dégage nettement la supériorité, au moins théorique, des systèmes dans lesquels on opère la régulation des vitesses et des efforts de traction, en faisant varier la tension aux bornes des moteurs sous l'emploi de résistances (monophasé, monotriphasé, systèmes Ward Leonard, Auvert et Ferrand).

» On s'aperçoit également que ces systèmes présentent l'avantage d'atténuer dans une notable mesure les variations de la puissance demandée à la ligne pendant les mises en vitesse.

» Mais quel que soit le système envisagé, la ligne de travail constitue peut-être la partie la plus délicate de l'installation.

» En effet, si on la prévoit aérienne, et cela est indispensable dès que la tension d'emploi dépasse une certaine valeur, il faut tenir le plus grand compte dans son établissement des conditions d'exploitation du chemin de fer.

» C'est ainsi que si nous examinons tout d'abord les lignes à double voie, la sécurité la plus élémentaire commandera de rendre les équipements électriques des deux voies parallèles complètement et strictement indépendants l'un de l'autre.

» Ceci pour, en cas d'accident intéressant l'une des voies, pouvoir faire voie unique temporaire avec la seconde.

» Nos voisins les Italiens ont ainsi compris et exécuté les installations des lignes à double voie qu'ils ont équipées à l'aide du triphasé.

» Chacune des lignes de travail, à deux fils, est portée par une console fixée à un poteau placé sur le bas côté de la plate-forme. Comme il est tout à fait rare que les accidents intéressent les deux côtés de la plate-forme, on a ainsi les plus grandes chances de voir l'équipement de l'une des voies être indemne.

» Pour les gares à marchandises et de triage, il convient d'étudier l'équipement électrique des voies, de manière à rendre, autant qu'il est possible de le faire, les voies parallèles indépendantes les unes des autres et cela nécessite pour les voies aériennes de multiplier le nombre des files de supports, ce qui est assez souvent une gêne importante, ainsi que les ingénieurs de l'État-Belge le signalaient récemment.

» Ajoutons à tout ceci que la voie aérienne avec retour par les rails et le plus souvent le sol, en particulier dans le cas du courant alternatif, constitue, par son action, un élément de perturbation important pour les transmissions télégraphiques et téléphoniques.

» On a lutté contre ces perturbations, on a obtenu des résultats incontestables, mais tant qu'on ne supprimera pas la cause initiale, ce que l'on emploiera ne sera jamais qu'un palliatif plus ou moins efficace.

» D'ailleurs, avec l'emploi du courant continu et le rail aérien, il ne faut pas croire que l'on soit complètement garanti contre ces perturbations; en effet, il y a les effets de la variation des débits, les effets des dentures des machines qui entrent en jeu et apportent

avec en plus l'électrolyse, des éléments indiscutables de trouble avec lesquels il faut compter.

» Aussi certains esprits, pénétrés de toutes ces difficultés, ont-ils cherché au cours de ces dernières années à mettre au point des dispositifs permettant de rapprocher l'un de l'autre le conducteur d'aller, c'est-à-dire le fil aérien, du conducteur de retour formé par le rail de roulement.

» On supprime ainsi dans l'œuf toute une série de causes de perturbations.

» Il est né de là un système d'équipement électrique des voies à éléments rapprochés du sol comprenant deux conducteurs voisins l'un de l'autre, dont l'un maintenu sensiblement au potentiel de la terre est inoffensif et sert de protecteur vis-à-vis de l'autre.

» Mais ce nouveau système n'a pas encore été soumis au contrôle de la pratique. Son fonctionnement est à examiner de près dans les régions dans lesquelles la neige est en grande abondance.

» En sorte que tout bien considéré, le problème de l'équipement électrique des voies est bien posé, mais qu'il ne paraît pas absolument et définitivement résolu.

» J'aurais terminé ce que j'avais à vous dire au sujet de la technique de ce système nouveau de traction, si un phénomène spécial ne s'ajoutait pas à tous ceux que nous venons d'énumérer rapidement.

» Il s'agit de ce que l'on appelle la *récupération*.

» Peu important dans les lignes peu accidentées et dans le cas de trains à arrêts peu fréquents, ce phénomène devient, au contraire, tout à fait intéressant pour les lignes à profils difficiles et pour les trains à arrêts rapprochés.

» Il consiste à renvoyer au réseau général l'énergie récupérée par les moteurs de traction pendant la descente des pentes ou pendant les périodes de décroissance de la vitesse.

» C'est à la récupération que l'on doit, en notable partie, la fortune des machines d'extraction électrique des mines.

» Là, l'électricité est nettement supérieure à la vapeur puisque, quand le mécanicien bat contre-vapeur ou qu'il freine par le frein continu, il absorbe de l'énergie sans en rien retrouver pour un usage subséquent.

» Mais, il ne faut pas confondre récupération avec freinage, car

si l'emploi des moteurs asynchrones dans le triphasé permet de récupérer aux vitesses hypersynchrones, il ne permet pas de freiner, c'est-à-dire d'amortir la vitesse, du moins sans dispositifs compliqués.

» Il convient enfin, bien qu'il ne soit pas dans nos intentions de traiter ici la grosse question de la production et du transport de l'énergie des usines aux points de transformation, c'est-à-dire en général aux gares de jonction, de dire un mot de cette transformation. On devra, en effet, quel que soit le système adopté pour la traction, monophasé ou continu, passer de la forme du courant de la distribution générale triphasé 50 périodes, si l'on est alimenté par le réseau ordinaire soit au monophasé 15 périodes, soit au continu et cela, en tout état de cause, par une transformation dynamique. A ce point de vue, les deux systèmes seront donc à peu près équivalents.

» Voilà, mes chers Collègues, le bilan technique de l'application de la traction électrique aux grands réseaux de chemins de fer. Il nous faut maintenant dire quelques mots du bilan économique.

» Si nous considérons tout d'abord les frais d'établissement proprement dits, il est bien évident que la traction électrique dont le matériel roulant, tracteurs, équipement des automotrices, etc., coûtera sensiblement le prix du matériel roulant à vapeur, conduira par ses fils de travail, par ses postes de transformation, ses feeders et sa part des usines à un capital d'établissement, en général très notablement plus élevé que celui que donnera la vapeur, par suite à des charges de capitaux plus importantes, ces charges de capitaux pouvant d'ailleurs être notablement atténuées dans le cas de lignes neuves par les facilités données pour les tracés, et dans les lignes anciennes par la diminution des dépenses résultant de l'emploi d'essieux moins chargés.

» Il faudra donc, pour que l'opération tienne, que les bénéfices d'exploitation, tout compris bien entendu, viennent compenser les différences de charges de capitaux déjà signalées.

» Quand je dis tout compris, c'est qu'il faudra mettre en balance non seulement les dépenses de traction proprement dites, mais également les recettes supplémentaires que la traction électrique permettra de réaliser en particulier en favorisant le trafic voyageurs par l'emploi des trains fréquents à automotrices, ainsi que l'augmentation de la capacité des lignes.

» Mais au milieu de la multiplicité des facteurs qui concourent à la formation de ce bilan, permettez-moi de vous répéter tout spécialement les rôles importants que sont appelées à jouer à la fois la traction des trains lourds de marchandises par effort de traction réparti et enfin la récupération obtenue autant que possible à toutes les vitesses et devenue par suite un moyen de freinage.

» Après tout, les chemins de fer auront aussi à tenir compte dans les éléments d'appréciation de toute nature sur lesquels ils seront appelés à baser leur décision, des grandes facilités d'exploitation que l'électricité répandue à foison le long des lignes apportera pour cet élément si important dans le développement de trafic, les appareils de manutention et l'éclairage, et aussi du développement d'énergie né, sinon de leur initiative, du moins fortement aidé par eux, ne manquera pas d'apporter dans l'industrie et le commerce des régions ainsi équipées.

» C'est dans cet ensemble que se trouvera, et là seulement, l'élément complet qui permettra de juger si l'opération est bonne ou mauvaise pour le pays.

» Enfin, dans les régions de houille blanche, viendra s'ajouter le facteur si important, en particulier pour notre pays, de la suppression de l'importation du charbon.

» A ce point de vue cependant, il ne faut pas oublier que d'autres industries peuvent être judicieusement les concurrentes du chemin de fer, et là encore la prudence voudra que des comparaisons sûres soient nettement établies.

» Telles sont, mes chers Collègues, les conditions générales dans lesquelles se pose ce problème si important de l'électrification des chemins de fer

» Ainsi que vous le savez, le Gouvernement français, aidé par divers réseaux, s'est depuis quelques mois donné la mission de l'étudier à fond et de le faire aboutir dans la mesure qui conviendra.

» Une Commission spéciale dont le président est l'un de nos plus distingués vice-présidents, M. Cordier, s'en occupe activement et une mission composée de représentants des Ministères des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes, et des Réseaux de Chemins de fer, après s'être documentée en France, en Suisse et en Italie, vient de partir pour l'Amérique.

» De son côté, le Gouvernement belge, qui a profité de la guerre

pour examiner la question dans ses détails, vient, après deux sessions tenues à Paris pendant la guerre, de réunir à Bruxelles, ces jours-ci, une Commission pour l'application de la traction électrique aux chemins de fer.

» Cette Commission, dont votre Président a eu l'honneur de diriger les travaux, a décidé, après avoir pris connaissance des études générales faites, la mise à l'examen définitif de l'électrification de la ligne de Bruxelles à Anvers, en spécifiant que toutes dispositions devaient être prises pour que le système adopté puisse être éventuellement étendu à l'ensemble des lignes belges.

» Une nouvelle session se tiendra en octobre à Bruxelles.

» De tout ceci ressort clairement que l'électrification des lignes de chemins de fer est à un tournant de son histoire et qu'elle se dispose à sortir du domaine restreint des sections spéciales pour passer à des applications beaucoup plus générales qui intéressent aujourd'hui les Gouvernements eux-mêmes.

» Mais alors, se pose la question de l'unification si nécessaire en pareil cas pour le choix des systèmes à adopter.

» Sommes-nous arrivés à un point où la technique est suffisamment assise pour qu'il soit utile de procéder à cette unification, ou moins avancés à ce point de vue qu'on pourrait le souhaiter, convient-il de laisser encore les diverses applications se faire sans restreindre les initiatives ?

» C'est ce que les Gouvernements français et belge auront à examiner au retour de la mission actuellement en Amérique.

» En tous cas, comme on peut le constater, les études se poursuivent sans relâche et tout fait prévoir des progrès incessants.

» Un dernier point, qu'il conviendra certainement de ne pas laisser dans l'ombre, c'est le point de vue militaire. La locomotive à vapeur, qui a fait merveille et a eu sa part notable dans notre Grande Victoire, verra-t-elle sa rivale venir prendre une place importante dans l'exploitation des grands réseaux ?

» C'est ce que nous saurons dans peu de mois. »

M. le PRÉSIDENT. — « Personne n'était plus autorisé que notre Président à poser devant la Société française des Électriciens le problème de la grande traction électrique. Non seulement il en avait le droit, mais je dirais presque le devoir.

» Dans une courte et lucide introduction, il vient de nous tracer les cadres dans lesquels il faut travailler si l'on ne veut pas s'égarer.

» L'éclectisme de M. Mazen, sa préoccupation constante du problème depuis plus de 20 ans, son modernisme, son goût des réalisations, enfin ses qualités d'administrateur doué d'un robuste bon sens qui lui a permis souvent de débrouiller en peu de temps des questions d'apparence confuse, donnent une grande autorité au programme de travail qu'il nous propose.

» Remercions donc M. Mazen d'avoir accepté, malgré le labeur écrasant dont il est chargé, la présidence de notre Société à un moment où il peut nous faire l'honneur de nous appeler à étudier une question dont il nous a montré l'ampleur économique et sociale, en nous invitant à donner en quelque sorte des opinions consultatives. C'est l'application à un cas particulier de la raison d'être de notre Société.

» La présence de M. Herdner, Président de la Société des Ingénieurs civils, Ingénieur en chef du Matériel et de la Traction, des Chemins de fer du Midi, et celle de M. Le Grain, Directeur des Chemins de fer de l'État, qui ont bien voulu assister à la séance sur l'invitation de notre Président, donne à ce geste toute sa valeur.

» Presque tous les ingénieurs de traction électrique de la Société française des Électriciens sont plus ou moins directement les élèves de M. Mazen.

» Ils applaudiront notre bonne fortune d'avoir écouté ce soir son introduction à la grande traction électrique. Quant aux autres ingénieurs, ils applaudiront aussi, car ils sont presque aussi intéressés dans la question; le problème de la grande traction électrique dépasse la grande traction électrique elle-même, sa solution devant réagir forcément sur la distribution de l'énergie électrique en France. »

SUR LES RÉCENTS PROGRÈS DE LA TÉLÉPHONIE SANS FIL.

M. C. GUTTON. — « Messieurs, une communication téléphonique sans fil est obtenue, en principe, de la manière suivante : le long d'une antenne d'émission, on entretient des oscillations non amorties, qui, en l'absence de transmissions téléphoniques, conservent une amplitude constante.

» Les ondes électromagnétiques rayonnées produisent le long de l'antenne de réception une force électromotrice et un courant périodiques de haute fréquence. En redressant, au moins partiellement, ce courant par un détecteur, on obtient un courant ondulé dont l'intensité moyenne n'est plus nulle et qui peut être considéré comme résultant de la superposition d'une intensité continue et d'une intensité alternative de haute fréquence. On fait passer ce courant dans un téléphone aux bornes duquel on dispose un condensateur. Ce dernier laisse passer les variations à haute fréquence, tandis que le téléphone est traversé par un courant d'intensité constante proportionnel à l'amplitude des oscillations reçues par l'antenne. Tant que cette amplitude reste constante, le téléphone est donc silencieux.

» Imaginons, maintenant, qu'on se serve des variations de résistance d'un microphone pour modifier l'amplitude des oscillations de l'antenne d'émission. L'intensité du courant dans le téléphone de réception varie en suivant tous les changements d'amplitude et par suite tous les changements de résistance du microphone. Le téléphone reproduit donc la parole.

» Pour réaliser une communication radiotéléphonique, il faut donc entretenir le long de l'antenne d'émission, non des séries discontinues d'oscillations amorties comme celles des postes à étincelles, mais des oscillations d'amplitude constante.

» Le poste à arc a d'abord été employé. Une des grosses difficultés provient de ce que les courants dans le microphone sont plus intenses que ceux qu'il est possible d'admettre dans les bons microphones ordinaires. Nous signalerons les intéressants résultats cependant obtenus par MM. Colin et Jeance.

» On peut aussi, mais seulement pour les ondes très longues, utiliser pour la téléphonie l'excitation des antennes par les alternateurs à haute fréquence tels que ceux qui ont été étudiés récemment en France par MM. Béthenod et Latour. Plusieurs procédés ont été

indiqués, parmi lesquels celui d'Alexanderson, pour faire agir le microphone sur l'amplitude des oscillations.

» Mais, c'est surtout lors de l'apparition en Radiotélégraphie, de la lampe-valve à trois électrodes, du genre de celle de de Forest, que la téléphonie sans fil est vraiment entrée dans la pratique courante.

» L'étude de ses remarquables propriétés a montré, en effet, qu'elle pouvait servir à entretenir le long d'une antenne des oscillations d'une parfaite régularité. Elle convient également bien pour toute puissance, toute antenne ou toute longueur d'onde et n'oblige jamais à admettre dans le microphone des courants dont l'intensité dépasse ceux qui sont utilisés dans la téléphonie ordinaire.

» D'autre part, en employant aussi la lampe-valve comme détecteur et comme amplificateur, on augmente beaucoup la sensibilité du récepteur; c'est là un gros avantage en Radiotéléphonie, car il faut remarquer qu'en mettant en jeu les mêmes puissances et à égale sensibilité du récepteur, les portées atteintes sont toujours inférieures à celles de la Radiotélégraphie.

» Lors de l'émission des signaux télégraphiques de l'alphabet Morse, on établit ou l'on supprime complètement le courant dans l'antenne d'émission; lors de transmissions téléphoniques, on produit seulement des changements d'intensité. Si l'on a réglé le poste de telle sorte que les syllabes contenant les voyelles *a* ou *o*, qui produisent de grandes modifications de la résistance du microphone, fassent passer de zéro à sa valeur maximum l'amplitude des oscillations de l'antenne, la voyelle *i* dont l'action sur le microphone est beaucoup plus faible ne produira que des modifications d'amplitude beaucoup plus petites. Or, la parole n'est transmise distinctement que si toutes les syllabes sont bien entendues; la portée limite sera seulement celle qui correspond aux syllabes les moins actives. L'intérêt de l'augmentation de sensibilité du récepteur est donc en téléphonie plus grand encore qu'en télégraphie.

» Il faut ajouter, de plus, que l'emploi en télégraphie de la réception par interférences produit encore une augmentation de portée dont la téléphonie ne peut profiter complètement.

» Voici quelques exemples des résultats obtenus durant ces dernières années, en faisant usage des lampes-valves pour les communications radiotéléphoniques. Dès 1915, il a été installé en Amérique un poste à lampes puissant, dans le but de faire des essais avec la station militaire de la Tour Eiffel. Les résultats ont été très encourageants; des phrases entières ont été entendues. Si l'on observe

qu'à cette époque les lampes étaient moins bien connues et que, vu les circonstances, les essais n'ont pu être que très intermittents, si l'on tient compte aussi de l'énorme portée obtenue dès le premier essai, il n'est pas téméraire d'espérer que des conversations suivies pourront, sous peu, être échangées entre les deux rives de l'Atlantique. Ces expériences marquent une étape fort importante dans les progrès des communications, car jamais auparavant et par aucun autre procédé des paroles prononcées aux États-Unis n'avaient pu être perçues en Europe; la téléphonie par les câbles sous-marins à de telles distances est, en effet, jusqu'ici impossible.

» La Radiotélégraphie militaire, sous la direction de M. le Général Ferrié, a créé pour les besoins de l'Armée de nombreux postes téléphoniques de petite puissance. Dès le début de 1916, un avion a pu rester en relation avec le sol; la même année deux avions ont échangé entre eux des conversations à plus de 10 km, malgré le bruit des moteurs; des réseaux radiotéléphoniques ont été installés pour les relations entre les îles et la côte de l'Océan et pour le service des polygones d'expériences.

» Vous me permettrez de rappeler maintenant les propriétés essentielles de la valve à trois électrodes. Une ampoule de lampe à incandescence, dans laquelle le vide est poussé aussi loin que possible, contient, outre le *filament* de tungstène, une seconde électrode constituée par une *plaque* de nickel. Entre la plaque et le filament, on dispose une troisième électrode, la *grille*; c'est un cadre métallique parallèlement à deux côtés duquel sont tendus des fils.

» Dans celui des modèles de la Radiotélégraphie militaire, qui a été fabriqué durant la guerre à plusieurs centaines de mille exemplaires, le filament rectiligne est tendu suivant l'axe d'un cylindre en tôle de nickel qui constitue la plaque. Entre ce cylindre et le filament, est enroulé, pour réaliser la grille, une hélice en fil de tungstène ou de molybdène.

» Relions la plaque (*fig. 1*) au pôle positif d'une pile P, dont le pôle négatif est réuni au filament, porté à l'incandescence par le courant d'une batterie d'accumulateurs P'. Les électrons émis par ce filament sont attirés par la plaque que la pile P porte à un potentiel plus élevé que le filament et un courant, mesuré par le milliampèremètre G, traverse l'espace vide d'air de l'ampoule.

» L'intensité de ce courant dépend de l'intensité du champ autour du filament; en changeant au moyen d'une pile P' la différence de potentiel entre ce filament et la grille, on modifie le champ de force et par suite l'intensité du courant de la pile P.

» Comptons les potentiels à partir de celui du pôle négatif O de

la batterie de chauffage du filament. La courbe de la figure 2 représente l'intensité du courant en fonction de la différence de potentiel entre la grille et le filament. Lorsque la grille est à un potentiel très inférieur à celui du filament, elle repousse les électrons et coupe le courant; lorsque son potentiel monte l'intensité croît et pour un potentiel assez élevé tous les électrons émis sont captés par la plaque ou par la grille et un courant de saturation est atteint.

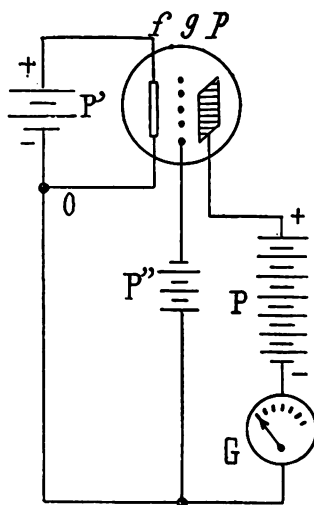


Fig. 1.

Dans les applications ordinaires de la lampe, le potentiel de la grille reste toujours bien inférieur à celui de la plaque, de sorte que le courant entre le filament et la grille reste toujours beaucoup plus faible qu'entre le filament et la plaque.

» En résumé, en modifiant le potentiel de la grille, il est possible de faire varier l'intensité du courant de plaque. La lampe constitue donc un relai et ce relai est extrêmement sensible et extrêmement fidèle, il peut, en effet, suivre des fréquences aussi grandes que celles des oscillations hertziennes. Elle peut servir à entretenir le long d'une antenne ou d'un circuit oscillant des oscillations de toute fréquence.

» Tandis qu'une antenne, excitée par des étincelles se trouve dans les conditions d'un pendule très amorti qui reçoit de temps en temps un choc, une antenne associée à une lampe à trois électrodes peut être mise dans les conditions d'un pendule d'horloge dont l'amplitude des oscillations reste constante.

» Dans une horloge, le mouvement du pendule guide celui d'un échappement qui libère périodiquement le poids moteur; celui-ci restitue au pendule l'énergie qu'il perd et entretient ainsi les oscillations.

» D'une manière analogue, imaginons qu'on fasse guider par les oscillations d'une antenne le potentiel de la grille d'une lampe; le courant de plaque est périodiquement ouvert et fermé et l'on peut, par les variations périodiques de ce courant, produire dans l'antenne une force électromotrice d'induction alternative qui entretient ses oscillations.

» Dans ce but, intercalons à la fois dans l'antenne et dans le circuit de plaque d'une lampe une bobine S (*fig. 3*). A l'instant où nous allumons la lampe, le brusque appel de courant dans la bobine S commence à faire osciller l'antenne, comme un choc initial met en mouvement le pendule d'une horloge. Couplons par induction à cette bobine S une seconde bobine S' reliée d'une part à la grille et d'autre part au filament; les oscillations de l'antenne y produisent une force électromotrice et il en résulte des oscillations périodiques du potentiel de la grille. La courbe de la figure 2 nous montre,

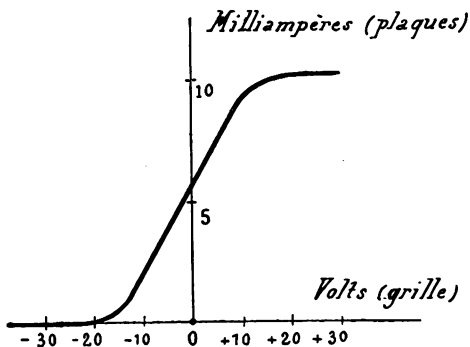


Fig. 2.

que l'intensité du courant de plaque varie. Ces variations déterminent dans la bobine S et dans l'antenne une force électromotrice de self-induction; si cette force électromotrice est assez grande et a la phase convenable, elle augmente l'amplitude des oscillations. Cette augmentation continue jusqu'à ce que l'amplitude des variations du potentiel de la grille amène le courant de plaque jusqu'à une intensité nulle lors des alternances négatives et jusqu'au courant de saturation lors des alternances positives; les oscillations de l'antenne se fixent alors à une amplitude constante.

» La théorie d'un tel dispositif indiquerait facilement **quelles sont les conditions à réaliser pour obtenir la plus grande intensité possible du courant de haute fréquence à la base de l'antenne.**

» Pour faire de l'appareil un poste transmetteur de **téléphonie sans fil**, il suffit de s'arranger de telle sorte que les **variations de résistance d'un microphone modifient l'amplitude des oscillations.**

» Un premier procédé consiste à mettre, comme dans les postes

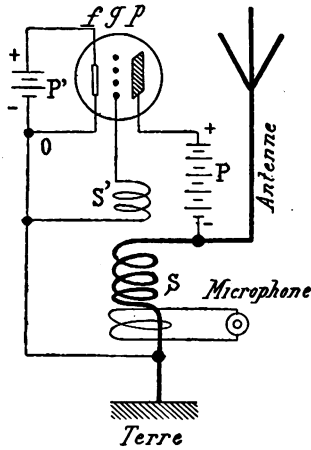


Fig. 3.

à arc, un microphone en dérivation sur quelques spires de la bobine S ou encore à fermer sur le microphone quelques spires de fil couplées à S (fig. 3).

» Dans ces conditions, l'induction mutuelle entre le circuit microphonique de résistance variable et la bobine S modifie les conditions d'entretien des oscillations et par suite l'amplitude de celles-ci.

» Imaginons qu'on ait réglé l'appareil à la limite d'entretien, c'est-à-dire au plus petit couplage entre S et S' pour lequel l'antenne oscille. La théorie et l'expérience montrent qu'on est alors dans les conditions pour lesquelles la puissance mise en jeu est la plus grande; ce sont aussi celles pour lesquelles les variations de résistance du microphone auront le plus gros effet et il est possible, sans admettre dans celui-ci des intensités exagérées, d'agir cependant énergiquement sur l'antenne. Pour les postes de faible puissance, c'est là, en effet, un procédé des plus simples et des plus efficaces.

» Lorsque la puissance du poste est trop grande et que le courant microphonique devient trop intense, il est facile d'imaginer d'autres dispositions qui donnent également d'excellents résultats et per-

mettent encore d'employer les bons microphones de la téléphonie ordinaire.

» Au lieu de faire conduire le potentiel de la grille par l'antenne elle-même, servons-nous d'abord d'une lampe de faible puissance *l* (*fig. 4*) pour entretenir les oscillations d'un circuit oscillant formé d'une self *S* et d'une capacité *C*. Employons, à cet effet, la disposition que nous venons de décrire. Puis disposons sur le circuit

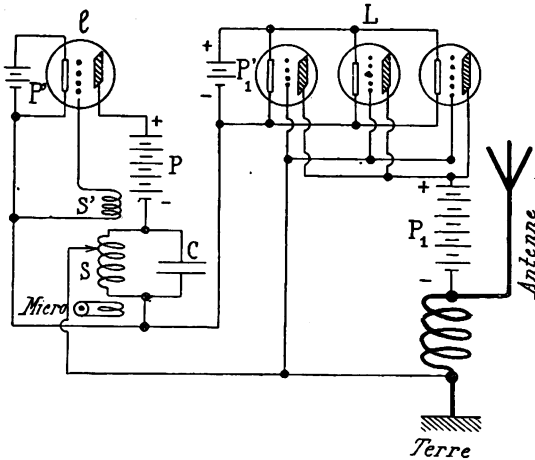


Fig. 4.

de grille d'une lampe émettrice de grande puissance ou de plusieurs lampes *L* en parallèle, un nombre convenable de spires de *S*. Nous ferons ainsi varier périodiquement le potentiel des grilles de ces lampes. C'est enfin sur le circuit de plaque de celles-ci que nous disposerons une bobine *S*₁ en série dans l'antenne.

» Dans ces conditions, si cette antenne et le circuit oscillant *CS* sont accordés exactement, on entretient encore les oscillations. On agira avec le microphone, comme il a été indiqué, sur l'appareil à faible puissance qui guide les potentiels de grille des lampes émettrices *L*.

» Voici, enfin, un troisième procédé qui a l'avantage de permettre de raccorder une antenne à un réseau téléphonique et de réaliser une conversation radiotéléphonique depuis le poste d'abonné du réseau. L'entretien des oscillations se fait encore comme il a été indiqué par la figure 3. On se sert du microphone pour changer le potentiel de la grille ce qui modifie les conditions de fonctionnement. A cet effet, on intercale, sur le circuit de grille, l'enroulement secondaire d'un transformateur microphonique (*fig. 5*) dont l'enroulement primaire est en circuit avec une pile et le microphone.

Il est bon, pour faciliter le passage des variations à haute fréquence, de disposer un condensateur en dérivation sur l'enroulement secondaire du transformateur.

» Lorsque, par suite des forces électromotrices à basse fréquence induites par les courants microphoniques, le potentiel de la grille monte, la courbe de la figure 2 nous indique que le courant de plaque que fournit la pile P augmente aussi; en ajoutant des selfs A

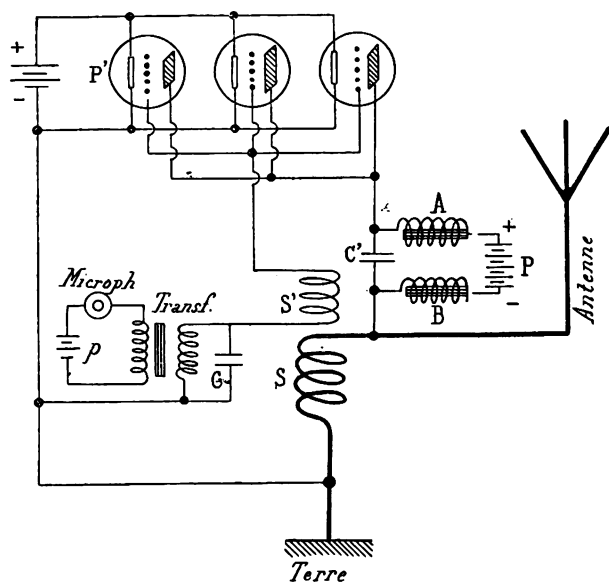


Fig. 5.

et B sur le circuit de plaque dans lesquels se produisent des forces électromotrices d'induction, on augmente la sensibilité à l'action du microphone. Un condensateur C' laisse passer les courants de haute fréquence. Un tel poste utilisé par la Radiotélégraphie militaire et étudié par M. le lieutenant Lévy a donné de très bons résultats. Il a permis de rester en relation téléphonique, avec un avion depuis Paris jusqu'à la distance d'Amiens.

» Nous remarquerons qu'il est possible de relier le microphone au transformateur par une ligne, puisqu'il n'y a pas de courant à haute fréquence dans le circuit microphonique. Rien ne s'oppose donc à ce qu'un abonné d'un réseau téléphonique puisse, de son propre appareil transmettre des conversations radiotéléphoniques par une antenne raccordée au réseau.

» Des combinaisons du genre de celle que nous venons d'indiquer sont encore rendues plus faciles en utilisant aussi la lampe

comme relai amplificateur téléphonique. Supposons que des courants téléphoniques arrivant par une ligne ll' (fig. 6) soient trop faibles, on les reçoit dans le primaire d'un premier transformateur T_1 , dont le secondaire est relié à la grille et au filament d'une lampe L_1 . De petites variations du potentiel de grille produisent des variations du courant de plaque de la lampe beaucoup plus grandes que les oscillations primitives. Avec d'autres transformateurs T_2 , T_3 et d'autres lampes L_2 , L_3 on peut encore amplifier à nouveau et obtenir finalement dans un récepteur A des courants dont

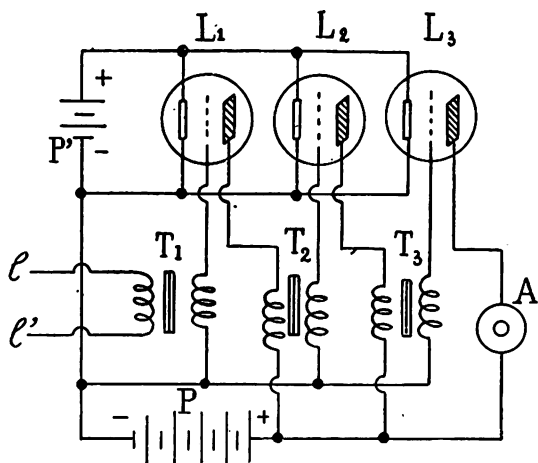


Fig. 6.

l'amplitude peut être jusqu'à 1000 fois supérieure à celle du courant primitif.

» On se servira utilement d'un tel amplificateur sur le circuit microphonique de l'appareil de téléphonie sans fil de la figure 5.

» L'amplificateur sert aussi à amplifier les courants à la réception et grâce à lui les portées des postes radiotélégraphiques ou radiotéléphoniques sont considérablement augmentées.

» Signalons, en passant, que l'amplificateur a beaucoup servi à l'écoute et à la surprise des communications téléphoniques dans les lignes et a de ce fait rendu de grands services.

» La Radiotélégraphie militaire doit, à MM. le Général Ferrié et le Capitaine Jouaust, un procédé de communication par le sol qui utilise aussi l'amplificateur. Il a maintes fois permis des liaisons à l'avant durant le combat et a été adopté par nos alliés et même par nos ennemis.

» La réception des conversations téléphoniques sans fil se fait exactement comme celle des postes radiotélégraphiques et grâce

à l'amplificateur les portées obtenues deviennent considérables.

» Pour conclure, devons-nous penser que la Radiotéléphonie doit supprimer la Radiotélégraphie? Cela est peu probable. Nous avons vu que les portées radiotélégraphiques étaient plus grandes; d'autre part la compréhension des signaux télégraphiques est plus facile que celle de la parole et moins sujette à erreur, surtout aux heures où les parasites atmosphériques dont jusqu'ici on n'a pu se débarrasser, sont intenses.

» Mais ce que l'on peut assurer, c'est que la Radiotélégraphie par ondes entretenues, lampes pour les petites et moyennes puissances, arc ou alternateur pour les grandes, remplacera, à cause de ses nombreux avantages, la Radiotélégraphie par les étincelles. Elle permet, en effet, de multiplier beaucoup les postes, tout en évitant le brouillage.

» Les syntonies et les résonances sont tellement aiguës qu'il est possible de faire fonctionner plusieurs postes dans le même local, de recevoir des signaux pendant la transmission même, ce qui au point de vue téléphonique est un gros avantage. Dès aujourd'hui l'échange de conversations, dans les conditions du téléphone ordinaire, sans faire aucune manœuvre pour passer de la transmission à la réception est possible. Comme un poste à lampes peut indifféremment servir de télégraphe ou de téléphone, il est certain que dans bien des cas, mais non toujours, la préférence sera donnée à ce dernier. »

M. le PRÉSIDENT. — « Permettez-moi, mes chers Collègues, de remercier M. Gutton de son intéressante Communication d'une si lumineuse clarté, rendue plus lumineuse encore par les schémas qu'il prodigue le plus heureusement du monde.

» Nous savons la large part prise par lui dans les travaux dont il vient de vous rendre compte; en tout cas, je n'hésite pas, quitte à offenser sa modestie, à vous le signaler.

» Je lui demanderai cependant d'ajouter à tout son savoir une perfection nouvelle, qui sera celle de venir souvent nous entretenir de ses expériences et de ses travaux.

» Vous me permettrez également de profiter de l'occasion pour envoyer à notre éminent collègue, M. le Général Ferrié, l'expression de l'admiration de la Société pour tous les beaux travaux qu'il a dirigés pendant la guerre et qui ont contribué pour une large part à notre victoire. »

La séance est levée à 22 h 15 m.

**PROGRAMME D'ÉLECTRIFICATION PARTIELLE DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS :
EXPÉRIENCE ACTUELLEMENT ACQUISE EN FRANCE ET A L'ÉTRANGER DANS
L'ÉLECTRIFICATION DES GRANDES LIGNES ;**

PAR M. A. MAUDUIT,
Professeur d'Électrotechnique à l'Université de Nancy.

(Suite et fin.)

Angleterre.

La traction électrique n'est utilisée en Angleterre que pour le service de banlieue, et le système adopté est en général, le courant continu à 600 volts, avec prise de courant par troisième rail.

Toutefois, il existe deux installations en monophasé à 25 périodes et sous 6000 volts : savoir la ligne de Lancaster-Morecambe-Heysam du Midland Railway (15 km) et dans la banlieue de Londres, les lignes du London Brighton and South Coast Railway (50 km); cette dernière Compagnie est en train d'exécuter l'électrification totale de la ligne de Londres à Brighton.

L'exploitation se fait par automotrices, à quatre moteurs série compensé de 115 à 150 chevaux.

Une caractéristique intéressante à signaler est l'emploi de la suspension caténaire du type triangulaire à double isolement.

Allemagne, Autriche, Suède et Norvège.

Nous groupons ensemble ces quatre contrées, parce que les installations effectuées ou projetées sont l'œuvre des usines allemandes de construction A. E. G. ou Siemens, ou de leurs filiales.

En Allemagne et en Autriche, les Administrations des chemins de fer avaient, dès 1910, décidé d'adopter, pour les électrifications à exécuter dans leurs réseaux, le courant monophasé à 15 périodes, à haute tension; cette tension fut d'abord choisie de 10000 volts, puis portée plus tard à 15000 volts. Le monophasé à 25 périodes y avait été employé bien auparavant pour les tramways suburbains : déjà en 1904, aux environs de Berlin, fonctionnait une ligne à 6000 volts, 25 périodes, avec moteur répulsion compensé du type Winter Eichberg, analogue au moteur Latour, avec enroulement inducteur sur haute tension directe.

La grande Société allemande A. E. G, qui fabriquait le moteur Winter-Eichberg, a continué à l'employer pendant longtemps encore, même quand la fréquence fut abaissée de 25 à 15 périodes, ce qui lui devenait défavorable; la Société Siemens et Schuckert utilise le moteur série compensé.

En Allemagne, le tronçon Dessau-Bitterfeld de la ligne Halle-Leipzig-Magdebourg a servi de ligne d'essais pour les chemins de fer de l'Etat prussien, notamment en ce qui concerne le fonctionnement de divers types de locomoteurs et les influences de la traction monophasée sur les lignes télégraphiques et téléphoniques (transformateurs, suceurs, fil de contre-tension, etc., dont les principes ont été indiqués lors de l'étude des chemins de fer du Midi français). Les premières installations exécutées ont été la ligne secondaire de Murmau à Oberammergau (Bavière) et la ligne de banlieue Ohlsdorf-Hambourg-Altona-Blankenese, puis les lignes du Wiesenthal (Duché de Bade) et de Salzbourg-Berchtesgaden (Bavière).

En Autriche, a été électrifiée la ligne de Vienne à Presbourg; le programme d'Etat comportait l'électrification de 4400 km de voies d'Etat du district alpin et de la Dalmatie et de 1800 km de voies privées au sud du Danube, avec exécution immédiate de la ligne de l'Arlberg.

En Suède, après la petite ligne de Tomteboda à Värtau près de Stockholm, a été mise en exploitation normale en janvier 1915, la section suédoise de *Kiruna à Riksgransen* de la ligne suédo-norvégienne, de Lulea à Narvik, située au nord de la Suède et de la Norvège.

Cette ligne transporte principalement des minerais de fer et utilise le courant de l'importante usine hydro-électrique de Purjus.

La section électrifiée a une longueur de 130 km et comporte des rampes atteignant au maximum 17,5 mm par mètre. Les trains à vapeur comportaient 28 wagons chargés à 35 tonnes de minerai et avaient une vitesse de 40 km : h en palier et 12 km : h en rampe de 10 mm; les trains électriques remorquent 40 voitures semblables avec des vitesses respectives de 50 et 30 km : h.

Ces trains vont de Kiruna à Riksgransen et reviennent à vide en sens inverse.

La vitesse moyenne passe ainsi de 25 à 38 km : h, et en tenant compte des interruptions dues au climat, on compte que la ligne pourra assurer un trafic annuel de 3,2 à 4,8 millions de tonnes.

La double traction faite d'abord suivant le système symétrique avec une locomotive à chaque extrémité, a donné des ennuis : oscil-

lations et secousses avec rupture d'attelage, au démarrage et même en marche. On intercale maintenant la seconde locomotive dans le train, on démarre avec une seule locomotive et l'on freine progressivement de l'arrière vers l'avant.

Il n'y a ni freinage électrique, ni récupération.

En Norvège, le premier chemin de fer à voie normale à traction électrique est celui de Rjukanfos. Cette ligne part de Notodden petite ville sur le lac Hitterdal à la cote 20 m et comporte un premier parcours de 30 km jusqu'à Tinnoset situé sur le lac Tinneje à la cote 200. Ce premier parcours, appelé chemin de fer de Tinnos, contient une rampe de 27 pour 1000 sur 4 km, au départ de Notodden. Le lac Tinnos est franchi, sur une longueur de 30 km par un ferry-boat, jusqu'à Rollag, d'où une seconde voie ferrée de 16 km de longueur, appelée chemin de fer de Vestfjorddal avec rampe maximum de 18 pour 1000 conduit jusqu'à Saaheim (cote 305 m), où sont situées les grandes usines dites de Rjukan (fabrication de produits nitreux par oxydation directe de l'azote atmosphérique).

La voie en rails de 25 kg au mètre courant, comporte des courbes de 150 m de rayon et n'admet pas un trafic à grande vitesse; la charge par essieu est limitée à 11 tonnes.

Le trafic prévu est par an, 200 000 tonnes de Notodden à Saaheim, à la montée, et de 300 000 tonnes à la descente; les wagons de voyageurs sont intercalés dans des trains mixtes.

Les trains passent tels quels sur le ferry-boat.

Le système d'électrification adopté est le monophasé, 15 périodes, 11 000 volts.

L'énergie est fournie par les usines hydroélectriques de Svaelfos et Lienfos au prix de 1 ore (1,4 c) le kilowatt-heure, courant en triphasé à 50 périodes, transformé en monophasé 15 périodes par des moteurs générateurs de 400 kv-A, comprenant un transformateur triphasé 11 000/500 volts, un moteur asynchrone à 500 volts et un alternateur monophasé bobiné pour 11 000 volts directs.

Le train maximum consiste en une charge remorquée de 290 tonnes.

Les locomoteurs de 500 chevaux comportent deux transformateurs; le réglage de la tension, aux moteurs groupés en parallèle, se fait par contacteurs électromagnétiques et bobines préventives, avec cinq échelons de tension de 90 à 220 volts.

Les moteurs série compensés sont du type dénommé série-répulsion (schéma de la figure 9 d); l'enroulement de compensation C présente la disposition originale d'être branché sous une tension

que le conducteur peut faire varier à volonté de 15 à 180 volts, au moyen d'une manette auxiliaire placée à côté de la manette principale du contrôleur. Les moteurs démarrent en répulsion et fonctionnent ensuite en série répulsion : la disposition est analogue à celle du locomoteur Thomson du midi français, sauf que dans cette dernière machine, la tension d'alimentation de l'enroulement compentateur est constante.

Remarque. — D'une façon générale, les locomoteurs allemands sont lourds, équipés avec des moteurs lents et souvent dissymétriques tant dans la répartition des organes que dans le mode d'attaque des bielles.

Nous ne possédons pas de renseignements sur les types plus récents.

Amérique.

MONOPHASÉ A 25 PÉRIODES ET MONOTRIPHASÉ.

Nous ne donnerons ici que quelques brèves indications d'ordre général; la question fera l'objet d'une communication ultérieure, au retour de la mission d'études envoyée en Amérique.

Aux Etats-Unis d'Amérique et au Canada existent un grand nombre de chemins de fer électrifiés en monophasé à 25 périodes, tant en lignes de banlieue que lignes de pleine voie, principales ou secondaires. Ces électrifications ont été en majeure partie exécutées par la Westinghouse Manufacturing Company, tandis que l'autre grande Société de construction rivale, le General Electric Company (G. E. Co) procédait à un grand nombre d'installations en courant continu à tension progressivement croissante, 1200, 1500, 2400, 3000, voire même 5000 volts.

La Société Westinghouse a d'ailleurs de son côté exécuté des installations en courant continu.

Le choix de la fréquence de 25 périodes par seconde, a été dicté par la présence de réseaux triphasés à cette fréquence, réseaux qui ont été établis pour le transport de l'énergie aux entreprises de traction à 600 volts avec transformation en continu par commutatrices. Ce choix a sûrement exercé une influence défavorable sur le fonctionnement du système monophasé et, en fait, nous devons constater qu'un grand nombre de ces installations ont été transformées en courant continu, tandis que, sur certaines autres, a été adoptée l'exploitation en monotriphasé. D'après les renseignements qui nous ont été communiqués par M. Parodi, la dépense d'entretien des machines motrices a toujours été beaucoup plus

élevée (plus du double) dans les installations monophasées que dans les installations à courant continu analogues, et c'est la raison principale qui a provoqué la transformation d'un grand nombre d'entre elles. Pour le chemin de fer de Washington-Baltimore-Annapolis, la transformation a été faite, de monophasé 6600 volts en continu 1200 volts, en une seule nuit, sans arrêter le service. Le poids des voitures a été réduit de 59 à 39 tonnes, le nombre de places de 66 à 56 seulement, et la consommation par kilomètre-voiture de 3,9 à 2,6 kw-h.

Nous n'insisterons pas sur la description de ces installations en monophasé direct à 25 périodes, le système qu'elles représentent étant notablement inférieur, à tous points de vue, au monophasé 15 périodes Européen. Nous nous contenterons de signaler quelques caractéristiques intéressantes relatives au New-York-New-Haven and Hartford Ry et au Pennsylvania Railroad. La première de ces deux entreprises est d'ailleurs la seule où il soit fait usage de locomoteurs, les autres exploitations se faisant par automotrices et constituant plutôt des tramways interurbains que des grandes lignes.

New-York-New-Haven and Hartford. — Le N. Y.-N. H. and H. a électrifié les lignes de banlieue de New-York à Stamford en 1907, la branche Harlem-River en 1912 et l'extension jusqu'à New-Haven en 1914. C'est le seul réseau américain qui emploie des locomoteurs monophasés directs.

La ligne New-York-New-Haven a une longueur d'environ 140 km, savoir :

De New-York à Woodlawn, 19 km de ligne à 4 voies, équipées en continu 600 volts, et communes avec le réseau du New-York-Central;

De Woodlawn à Stamford, 35,5 km à 4 voies;

De Harlem à New-Rochell, 16,6 km à 2 voies;

De Stamford à New-Haven, 67 km à 2 voies.

Toutes ces dernières lignes à 11000 volts monophasés, 25 périodes.

La pente maximum est de 4 mm par mètre.

On est en train d'électrifier 40 km de lignes nouvelles, sur le New-York-Connecting Railroad, dans la même région, avec pentes de 7,2 et 12 mm.

Le trafic sur les 73 km équipés en 1912, était annuellement de

deux millions et demi de trains-kilomètre, avec une recette kilométrique de 200 000 fr, rien que pour les voyageurs.

Le Système d'électrification employé est le monophasé direct 1100 volts, 25 périodes.

Le parc comprend une centaine de locomoteurs de divers types.

Une quarantaine de locomoteurs 001 à 041 (1 — B + B — 1), à bogies articulés, avec moteurs lents, dont l'armature est directement montée sur un arbre creux entourant l'essieu et le commandant par l'intermédiaire d'une roue élastique constituée par 6 ressorts à boudin reliant les 6 bras d'un croisillon solidaire de l'arbre creux avec ceux de la roue de l'essieu même.

Ces moteurs (*gearless*, sans engrenages) sont forcément lents et lourds pour leur puissance : le locomoteur en comporte 4, développant ensemble une puissance unihoraire de 11200 chevaux, avec roue motrice de 1,60 m, et pèse 109 tonnes, dont 76 tonnes de poids adhérent.

Le poids est ainsi d'environ 100 kg par cheval unihoraire; l'effort de traction est de 6300 kg au régime unihoraire.

Dans les locomoteurs 073-111, la même disposition de bogies articulés a été conservée, mais pour obtenir une puissance plus grande, tout en allégeant la machine, on a remplacé le moteur sans engrenages par deux moteurs jumelés attaquant symétriquement par pignon denté une même roue d'engrenage, calée sur un arbre creux qui entraîne l'essieu au moyen de la roue élastique décrite plus haut : cette disposition est fréquemment employée par la Compagnie Westinghouse.

Le locomoteur ainsi obtenu, lorsqu'il est équipé seulement pour courant alternatif, pèse 91 tonnes, et développe une puissance unihoraire de 1700 chevaux, soit 54 kg par cheval unihoraire. Certaines de ces machines sont disposées de façon à pouvoir remorquer les trains sur le tronçon commun au New-York Central, en courant continu 600 volts, et leur équipement beaucoup plus complexe porte leur poids à 120 tonnes.

Actuellement sont en commande des locomoteurs Westinghouse de 180 tonnes, à deux bogies articulés, chacun du type 1-C-1, c'est-à-dire comprenant chacun trois essieux moteurs, entre deux essieux porteurs.

Ces locomoteurs comportent 2 moteurs par essieu, comme les locomoteurs de 220 tonnes précédents, soit en tout 12 moteurs, développant une puissance unihoraire totale de 2550 chevaux, soit un poids de 70 kg par cheval (avec équipement mixte continu

et monophasé). Le poids adhérent est 18,6 tonnes par essieu, au total 112 tonnes.

Ils pourront remorquer un train de 12 wagons Pullmann en acier, soit 850 à 900 tonnes, sur les pentes de 7,2 pour 1000 : leur vitesse maximum est 110 km : h.

Les moteurs sont connectés par 3 en série d'une façon permanente.

Le parc comporte aussi des automotrices.

De Stamford à Woodlawn (33 km), la consommation est de 22 watts-heure par T : km, pour les express faisant environ 75 km : h, avec le parcours total sans arrêt, et 55 watts-heure par T : km pour les omnibus à 36 km : h avec 13 arrêts (la tonne américaine est de 906 kg).

Pour les trains de marchandises de New Rochelle à Stamford (23 km), avec des trains de 1290 tonnes, vitesse de 59 km : h et parcours sans arrêt, 17,8 watts-heure par T : km.

Le courant fourni par l'usine thermique de Cos Cob, en triphasé 11 000 volts, 25 périodes, par 4 groupes turbo-alternateurs de 5000 kw et 4 de 3750 kw. Il a été question d'employer une distribution à 3 fils à 2×11000 volts, avec un pont à plus de 11000 volts et un pont à moins de 11000 volts, dans le but de réduire à la fois la perte de charge et les influences sur les lignes télégraphiques, mais nous n'avons pu savoir si ce dispositif a été expérimenté ou non.

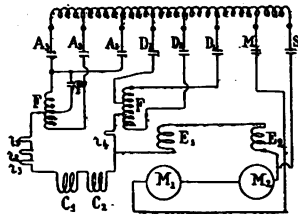
L'entretien des locomoteurs, au nombre de 47, pendant les années 1910 et 1911, a coûté en moyenne par an 13500 fr par locomoteur, pour un parcours kilométrique de 84000 km, soit 0,22 fr par locomoteur-kilomètre, soit trois fois plus que les locomoteurs analogues à courant continu du P. O. âgés de 12 ans et revenant à 5800 fr pour 38000 km.

L'électrification du réseau a été déterminée sur l'ordre de l'Etat de New-York, qui l'a imposée en même temps au New-York-Central : elle a d'ailleurs donné d'excellents résultats, après quelques dérangements dans les premières années, en particulier à la suite des court-circuits fréquents, contre lesquels on a lutté en introduisant des bobines de self dans le réseau pour réduire le courant de court-circuit des turbo-alternateurs.

Pennsylvania Railroad. — La grande compagnie du Pennsylvania Railroad a électrifié en monophasé à 15 périodes, 11000 volts, la ligne suburbaine à grand trafic (4 voies, longueur 32 km) de Philadelphie (Broad Street station à Paoli (1915) et tout récemment

l'embranchement de Chesnut-Hill (20 km), comprenant une ligne à 4 voies de Broad Street Station à North Philadelphia Station et une ligne à 2 voies de cette dernière gare à Chesnut Hill.

Il s'agit là d'un service de banlieue exclusivement, l'exploitation se fait par automotrices, équipées chacune de deux moteurs de 225 chevaux; le parc compte actuellement 115 automotrices.



crans	P	A ₁	A ₂	A ₃	D ₁	D ₂	D ₃	M	S
1	o			o				o	o
2			o	o				o	o
trans			o	o				o	o
3			o	o				o	o
4	o		o	o				o	o
5		o	o	o				o	o
6	o	o						o	o
7	o	o						o	o
7A	o	o			o			o	o
7B		o	o	o				o	o

Fig. 18. — Schéma de traction simplifié des automotrices nouvelles de Pennsylvand à Railway.

Les trains de 2 à 7 voitures, toutes automotrices, ont comme vitesse maximum 96 km : h.

La ligne est du type catenaire double, avec poteaux en bois généralement.

Faisons remarquer, en passant, que l'on emploie énormément les poteaux de bois en Amérique; ces poteaux sont souvent à très forte section; le bois de cèdre, non injecté, est le plus utilisé, et l'on estime que ce genre de poteaux même non imprégnés, est susceptible de durer une quinzaine d'années, les poteaux métalliques sont quelquefois employés, mais les poteaux en ciment armé sont pratiquement inconnus.

Les moteurs utilisés sur les automotrices sont une variante du type série répulsion décrit plus haut dans la figure 9 d : ils démarrent avec un montage différent de celui de la marche normale, montage appelé en *alimentation inversée* (fig. 18) : les inducts, au lieu d'être en court-circuit comme dans la marche en répulsion,

sont fermés sur une portion MS du transformateur, avec tension inversée, ce qui a pour conséquence d'augmenter le courant dans ces induits, la tension ainsi introduite s'ajoutant à leur force électromotrice pour débiter en court-circuit.

A partir du cran 3, le moteur est disposé en *double alimentation*, ou en *série répulsion*, et l'on fait varier les deux tensions d'alimentation par l'intermédiaire de bobines de self préventives F et F', au lieu de résistances.

Nous avons cru intéressant de signaler ces diverses variantes du moteur monophasé de traction; il est à prévoir que d'autres formes surgiront encore, étant donné surtout que le brevet Behn Eschenburg, qui couvre le meilleur de tous ces moteurs, va tomber incessamment dans le domaine public.

Citons encore une disposition des automotrices, au point de vue du freinage. Ces machines sont munies d'un freinage électro-pneumatique, dans lequel la dépression dans la conduite de frein est produite dans chaque voiture, soit par le robinet pneumatique du mécanicien, soit par une valve électromagnétique actionnée par les courants émis par un petit tambour adjoint au robinet usuel.

SYSTÈME MONOTRIPHASÉ.

Dans ce système, le courant monophasé à 25 périodes est transformé, sur le locomoteur, en courant triphasé, au moyen d'un convertisseur spécial; les moteurs et l'appareillage de contrôle sont les mêmes que dans le système triphasé.

Le convertisseur (*fig. 19*) est constitué par un moteur d'induction monophasé, dont l'enroulement principal statorique P est branché en dérivation entre les bornes extrêmes du secondaire du transformateur monophasé du locomoteur. Le rotor de ce convertisseur est formé de la cage d'écureuil classique et l'appareil est mis en route au moyen d'un petit moteur série compensé placé en bout d'arbre et non représenté sur la figure.

Le stator porte un second enroulement S, placé à angle droit avec l'enroulement P, comme le serait la deuxième phase d'un moteur déphasé, et cet enroulement au milieu C du secondaire du transformateur principal.

Quand le convertisseur est en route, au quasi-synchronisme, le champ résultant, produit dans l'appareil par la combinaison des forces magnétomotrices de l'enroulement statorique P et du rotor, est un champ tournant presque parfait, le rôle du rotor en cage d'écureuil consistant à étouffer tous les champs parasites qui ne

tournent pas dans le même sens et à la même vitesse. Ce champ résultant engendre dans l'enroulement principal P une force électromotrice égale et opposée à la tension appliquée à ses bornes et dans l'enroulement supplémentaire S, à angle droit avec le premier, une force électromotrice en quadrature de phase avec la précédente. Pour obtenir entre les points A' et C' d'une part, B' et C' d'autre part, deux tensions constituant, avec la tension A' et B',

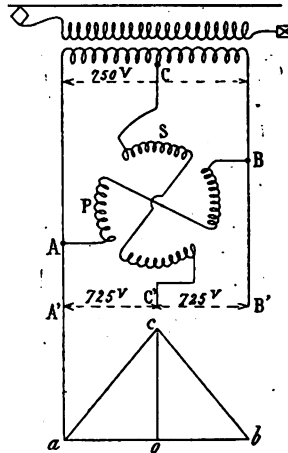


Fig. 19. — Schéma du convertisseur monotriphasé.

trois tensions triphasées, c'est-à-dire égales en amplitude et décalées respectivement l'une sur l'autre d'un tiers de période, il suffit que les forces électromotrices produites dans l'enroulement S et dans l'enroulement P soient entre elles dans le rapport de la hauteur OC d'un triangle équilatéral à son côté ab , ce qu'on réalise en adoptant un nombre convenable de spires. Finalement, les points A', B' et C' constituent les trois bornes de la distribution triphasée, qui alimente les moteurs de la voiture.

La puissance triphasée dans le convertisseur est égale à la moitié de celle qui est absorbée par les récepteurs triphasés, chaque enroulement du convertisseur absorbant ou produisant cette demi-puissance, ce convertisseur doit être dimensionné comme un moteur diphasé dont la puissance soit égale à celle qui est mise en jeu dans les récepteurs.

Les locomotives monotriphasées ont les caractéristiques des machines triphasées, dont elles ne diffèrent que par l'emploi d'un seul fil de contact et la présence du convertisseur, et jouissent des mêmes propriétés, au point de vue constance de la vitesse et récep-

tion automatique au-dessus du synchronisme. Toutefois, la présence du convertisseur entraîne une diminution du rendement et du facteur de puissance.

A l'heure actuelle, fonctionne en monophasé la ligne Bluefield-Vivian du Norfolk and Western Railway, tandis que se prépare l'installation de la section Altona-Johnstown du Pennsylvania Railroad.

Ligne de Bluefield à Vivian. — La section de Bluefield à Vivian s'étend sur une longueur de 48 km, dans la partie sud de la Virginie de l'Ouest. Sauf dans le tunnel d'Elkhorn, la voie est double et souvent même triple, les courbes sont fréquentes, ainsi que les rampes atteignant 20 mm par mètre.

Le trafic consiste principalement en trains de charbon se dirigeant généralement vers l'Est (Bluefield); les autres trains de marchandises et de voyageurs traversent les rampes de la station électrifiée, en utilisant les locomoteurs électriques comme machines de refoulement, tout en conservant en tête leur locomotive à vapeur.

Un locomoteur électrique remorque des trains de 3000 tonnes, à la vitesse de 22,5 km : h, avec machine de renfort en queue pour les rampes dépassant 15 mm, alors qu'auparavant il fallait employer 2 locomotives Mallet en tête (et une en queue, dans les rampes), pour réaliser une vitesse de 9,5 km : h seulement. Avec deux locomoteurs électriques en queue et un en tête, on a pu remorquer des trains de 4300 tonnes.

Sur une section d'environ 15 km, entre Cooper et Graham, où la pente maximum est de 4 pour 1000, la vitesse adoptée est double, soit 45 km : h.

L'installation est prévue pour 20 trains par jour de 2925 tonnes vers l'Est, et le nombre actuel (1915) est de 12 trains.

Le fil de contact est alimenté à la tension de 11000 volts.

Les locomoteurs monotriphasés Baldwin-Westinghouse, au nombre de 12, sont constitués de deux demi-machines accouplées, développant au total une puissance de 5000 chevaux, avec un poids de 243 tonnes, dont 198 tonnes adhérentes; le poids par cheval est ainsi 48,6 kg.

Chaque demi-locomoteur est du type 1 — B + B — 1, à bogies articulés, avec chevilles du type Mallet (diamètre des roues motrices 1,57 m et roues porteuses 0,762 m); il comporte, par bogie, deux moteurs jumelés attaquant par engrenage, avec roue élastique, un faux essieu placé au milieu des essieux moteurs et, à leur

niveau, la transmission à ces essieux se faisant par des bielles d'accouplement horizontales. L'effort total développé, par locomoteur complet, est de 50 tonnes en rampe de 10 pour 1000; au maximum, il a atteint 80 tonnes, soit une adhérence de 40 pour 100.

Il y a en tout, par locomoteur complet, 8 moteurs asynchrones, avec rotor bobiné, disposés pour fonctionner *normalement* à 8 pôles, à la vitesse de 22,5 km : h; la vitesse exceptionnelle de 45 km : h est obtenue en supprimant quatre pôles. Les rotors ont trois bagues de chaque côté; le démarrage se fait par rhéostat liquide avec circulation d'électrolyte de refroidissement.

Il y a un convertisseur par demi-locomoteur.

La commande est à unités multiples.

Ligne Altona-Johnston (P. R. N.) (en cours d'exécution). — Le Pennsylvania Railroad prépare l'organisation de la traction monophasée sur la section montagneuse Altona-Johnston (Allegheny Mountains) : cette section est longue de 60 km environ, et comporte une rampe de 20 pour 1000 sur 20 km, avec un trafic journalier moyen de 300 000 tonnes.

La section n'est pas encore équipée électriquement, les essais des locomoteurs se feront sur le tronçon Philadelphia à Paoli du même réseau, au besoin aussi sur la ligne précédente de Bluefield à Vivian.

Les nouveaux locomoteurs Baldwin-Westinghouse, composés également de deux demi-machines, diffèrent de ceux de la ligne précédente, par quelques particularités.

Chaque bogie comporte un essieu porteur et *trois essieux moteurs*, commandés au moyen de bielles par un faux essieu situé à l'extrémité extérieure du bogie, dans le même plan horizontal; ce faux essieu est à son tour attaqué, avec engrenage et roue élastique, par deux moteurs symétriques.

Le poids total est 240 tonnes, dont 198 adhérentes, et la puissance 4800 chevaux.

La vitesse normale est 33 km : h; une seconde vitesse de 16,5 km : h, servant aux manœuvres, est obtenue par couplage en tandem des deux moteurs de chaque bogie. L'effort développé à la jante des roues de 1,83 m de diamètre, à la vitesse de 33 km : h, est 40 tonnes, correspondant à un train de 3350 tonnes, sur rampe de 10 pour 1000. Deux locomoteurs en traction symétrique pourront remorquer un train de 3900 tonnes sur la rampe de 20 pour 1000, d'une longueur de 20 km d'Altona à Gallitzin, et un train de 6900 tonnes sur la rampe de 10 pour 1000, d'une longueur de 40 km, de Johnstown à Gallitzin.

RÉSUMÉ DES PROPRIÉTÉS CARACTÉRISTIQUES DE LA TRACTION MONOPHASÉE.

Le système monophasé présente, par rapport au triphasé, l'avantage fondamental de n'exiger qu'un seul fil de contact, au lieu de deux.

L'emploi d'une tension élevée au fil de contact (12000 à 15000 volts) permet d'espacer les transformateurs d'alimentation, sans consommer trop de cuivre dans les lignes; cette tension élevée rend nécessaire l'installation sur le locomoteur, d'un transformateur réducteur, mais ce transformateur permet de réaliser le réglage de la vitesse et du couple moteur, sans pertes rhéostatiques, et avec un degré de continuité qui n'est égalé dans aucun autre système; quand on n'agit pas sur le réglage, le moteur fonctionne sensiblement à puissance constante, la vitesse variant en sens inverse du couple moteur.

Les moteurs monophasés modernes, à la fréquence de 15 à 17 périodes, réalisent une commutation absolument satisfaisante, avec des puissances spécifiques du même ordre que celles des autres systèmes.

Les perturbations produites sur les lignes à courant faible sont considérables, comme dans le système triphasé, et il n'est pas certain qu'on arrive à les combattre victorieusement, même avec des moyens de protection multiples et coûteux, autrement qu'en écartant les lignes des voies électrifiées ou en les mettant sous câbles, à l'état de circuits bifilaires.

Comme pour le triphasé à 16 périodes, le monophasé à la même fréquence, rend nécessaire l'établissement de centrales spéciales (ou au moins de groupes électrogènes spéciaux, qui sont d'ailleurs très lourds et à rendement moindre que les groupes normaux) ce qui constitue une entrave non négligeable à l'unification désirable de la production de l'énergie dans les Centrales; l'obtention du courant monophasé de traction, en partant du triphasé à 50 périodes, demanderait une transformation rotative, onéreuse comme installation et fort préjudiciable au rendement global.

Il ne nous est pas possible de porter maintenant un jugement ferme sur le système monophasé; d'une part, en effet, ce système n'est pas arrivé à un degré de mise au point comparable à celle du triphasé (l'usage du freinage électrique est encore dans la période d'études et les locomoteurs nouveaux étudiés pour les C. F. F. suisses diffèrent considérablement du type de Lœtschberg, considéré comme le plus parfait à l'heure actuelle); d'autre part, il

semble préférable d'attendre d'avoir pu étudier sur place l'expérience américaine, surtout en ce qui concerne le monotriphasé, système qui n'est encore qu'à ses débuts, et dont il importe de connaître les résultats, pour se faire une opinion sur la valeur exacte de la distribution monophasée.

IV. — SYSTÈME « COURANT CONTINU A HAUTE TENSION ».

TRACTION INTERURBAINE EN COURANT CONTINU 1200 VOLTS.

Le courant continu a été le premier employé pour la traction électrique des tramways urbains et suburbains et c'est, à l'heure actuelle, le système standard pour ce type de traction, sous la tension de 600 volts, avec fil aérien pour les tramways urbains et troisième rail pour les chemins de fer de banlieue.

Pour l'extension de la traction électrique à des distances plus grandes, avec des trafics plus faibles, on a beaucoup utilisé, en Amérique, le monophasé à 25 périodes, comme il a été indiqué dans le chapitre précédent, mais on a eu aussi recours au courant continu à 1200 volts; ce système de courant continu à 1200 volts avec fil aérien est maintenant extrêmement répandu en Amérique et est devenu presque aussi « standard » que le continu à 600 volts pour les tramways; il possède son appareillage absolument consacré et il est tellement en faveur, qu'un grand nombre d'installations de chemins de fer interurbains, primitivement établies en monophasé 25 périodes, ont été transformées en continu 1200 volts.

Dans la plupart des cas, le courant continu à 1200 volts est obtenu par transformation du triphasé à 25 périodes au moyen de deux commutatrices à 600 volts en série; ces commutatrices sont généralement compound, avec pôles auxiliaires, les enroulements de compoundage et de commutation étant intercalés entre la terre et les induits. Exceptionnellement, il est fait usage de commutatrices directes à 1200 volts, ou de moteurs générateurs.

La plupart de ces réseaux comportent des tronçons urbains à 600 volts; les automotrices sont généralement équipées avec des contacteurs et des moteurs fonctionnant sous 600 volts; les quatre moteurs sont groupés en série parallèle dans les zones à 1200 volts et en série parallèle ou parallèle dans les zones alimentées à 600 volts. Un moteur générateur spécial, appelé *dynamoteur*, produit le courant à 600 volts nécessaire pour la commande des contacteurs et des autres services auxiliaires, dans les zones à 1200 volts

tandis que ces appareils sont branchés directement sur la ligne dans les zones à 600 volts.

APPLICATION DU COURANT CONTINU HAUTE TENSION A LA TRACTION
DE GRANDES LIGNES.

Encouragés par le bon fonctionnement des installations à 1200 volts, les Américains ont essayé, avec plein succès, d'élever la tension à 2400 volts et équipé ainsi la ligne Butte à Anaconda, du Pacific Railway, dans l'état de Montana; ensuite a été exécutée à 3000 volts, la plus grande électrification du monde, celle de la section de Harlowton à Avery, de la ligne du Chicago-Milwaukee et Saint-Paul qui s'étend sur 710 km, à travers les montagnes Rocheuses et fonctionne en entier, depuis le début de l'année 1917.

L'électrification d'un second tronçon, d'une longueur de 360 km d'Othello à Tacoma, est en cours d'exécution.

Ligne de Butte à Anaconda (2400 volts). — La ligne a une longueur de 53 km, à voie unique, s'étendant de Butte Hill Yard à la fonderie de East Anaconda; la portion principale a une longueur de 42 km, de Butte à East Anaconda.

Le service entièrement électrique a été mis en route en novembre 1913.

Le tonnage annuel (minerais de cuivre des mines de Butte aux usines d'Anaconda et approvisionnements divers) est de 4,5 millions de tonnes; les trains de 50 wagons de minerais pèsent environ 3000 tonnes.

Dans la ligne principale, sur une longueur de 30 km environ, la rampe maximum est 3 pour 1000. dans le sens de marche des trains chargés de minerai, qui sont alors de 4000 à 4500 tonnes. Entre la gare de East Anaconda et les fonderies, avec rampe maximum de 17 pour 1000, les trains sont de 1400 tonnes environ.

Il y a en plus par jour quatre trains de voyageurs dans chaque sens de chacun 4 voitures.

Les locomoteurs sont composés de deux unités, susceptibles d'être utilisées indépendamment dans les manœuvres. Chaque unité du type, comporte deux bogies articulés dont les 4 essieux sont moteurs, sa puissance unihoraire est 1250 HP et son poids 72,5 tonnes, soit 58 kg par cheval.

La réduction par engrenage varie avec la destination de l'unité : pour trains de voyageurs, la vitesse maximum prévue en palier est 72 km : h (réduction 25 : 80, roues motrices de 1,17 m); pour

trains de marchandises, vitesse en palier 34 km : h, en rampe normale 24 km : h, réduction 18 : 87. Dans ces derniers locomoteurs, l'effort de traction par unité simple est de 13,6 tonnes à la charge unihoraire et 11,34 tonnes à la charge continue (1050 HP).

Les moteurs isolés pour 2400 volts et bobinés pour 1200 volts sont toujours groupés par deux au moins en série.

Ligne des montagnes Rocheuses (continu 3000 volts); Chicago, Milwaukee et Saint-Paul. — Le tronçon actuellement en fonctionnement s'étend sur 710 km, de Harlowton à Avery (voir fig. 20) à la traversée des montagnes Rocheuses dans les États de Montana et Idaho; son profil est donné dans la figure 21.

La première section électrifiée Three Forks à Deer Lodge

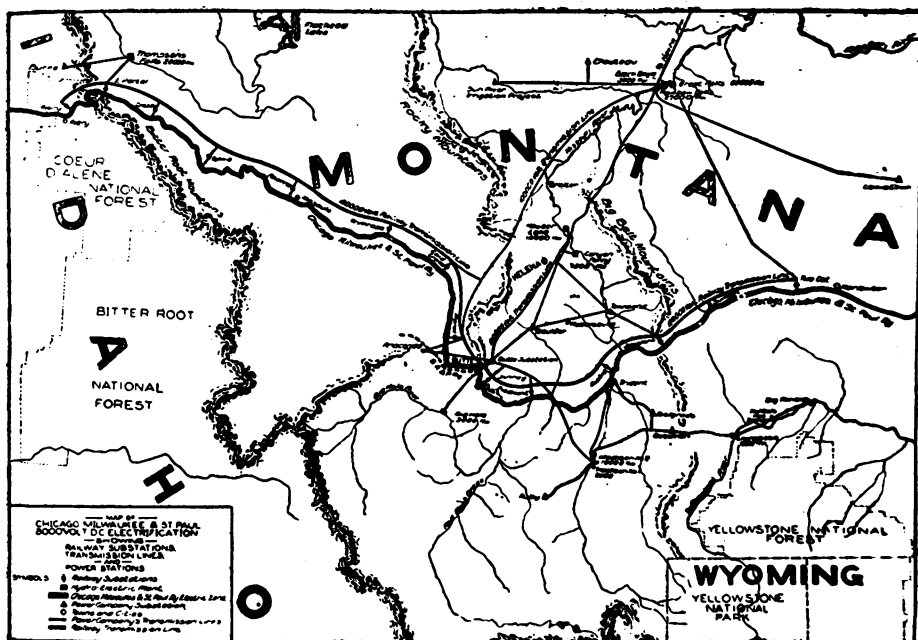


Fig. 20. — Plan de la ligne des montagnes Rocheuses.

(185 km) fut inaugurée en décembre 1915 avec service complètement électrique sur les deux sections de Deer Lodge à Three Forks et de Three Forks à Harlowton (365 km) à partir de juillet 1916; l'ensemble du tronçon de Avery à Harlowton a été mis en service en février 1917.

La pente maximum atteint 20 mm par mètre.

Les trains de marchandises sont couramment de 2500 tonnes et

les locomoteurs sont établis pour remorquer ces trains sur une pente de 10 pour 1000, soit un effort de traction de 33 tonnes, à 25,4 km : h environ avec 860 ampères sous 3000 volts, ce qui correspond à une puissance absorbée de 2580 kw.

Les trains transcontinentaux Olympian et Columbian sont également trainés par les locomoteurs électriques qui remorquent à 96 km : h en palier, des trains de 800 tonnes.

Le système a été choisi d'après l'expérience acquise dans l'installation voisine, de Butte à Anaconda, à 2400 volts continus, sommairement décrite plus haut. On a estimé pouvoir porter la tension de 2400 à 3000 volts, mais on a calculé qu'il n'y avait pas intérêt à exagérer cette augmentation de tension. En particulier, l'hypothèse d'une tension de 5000 volts a été envisagée, mais on l'a rejetée parce qu'on a trouvé que l'économie de cuivre réalisée sur la ligne serait plus que compensée par l'élévation du prix des locomoteurs et des groupes convertisseurs.

La ligne de contact est à suspension caténaire simple, mais avec deux fils de contact de 11,68 mm de diamètre (au total 214 mm²).

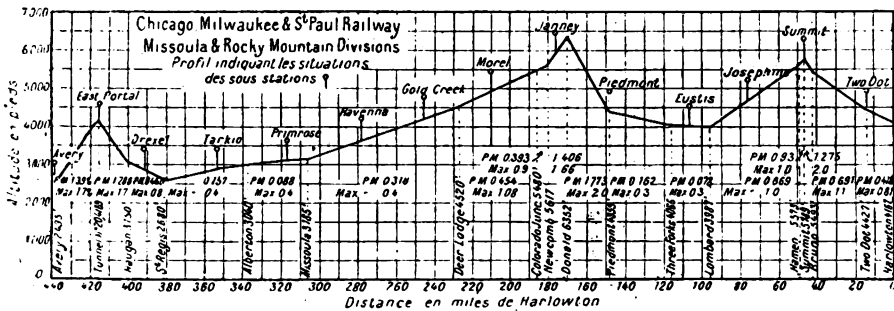


Fig. 21. — Profil en long de la ligne des montagnes Rocheuses.

reliés au fil porteur par des pendules en quinconce, pour augmenter la souplesse de l'ensemble.

Les surfaces frottantes des pantographes sont constituées par deux sabots de cuivre, indépendants, avec rainure centrale de graissage, ce qui permet la captation de 2000 ampères à 16 km : h. Des feeders de cuivre doublent la ligne dans les rampes, à raison de 250 mm² de section pour les pentes de 10 mm et 700 mm² pour les pentes de 20 mm.

La chute de tension maximum est de 20 pour 100 quand deux trains de 2500 tonnes se trouvent ensemble au milieu d'un intervalle entre stations, en moyenne elle est de 10 pour 100.

La ligne est posée sur des consoles fixées à des poteaux en bois.

L'énergie, provenant de la Montana Power Co, ou triphasé, 100 000 volts, 60 périodes, est fournie à la ligne de contact par 14 sous-stations, réparties sur les 710 km de ligne, à un écartement de 50 km environ.

Sur les sous-stations, dix comprennent chacune deux groupes moteurs générateurs de 2000 kw, trois desservant des portions en rampe possèdent trois groupes de 1500 kw et une seule comporte trois groupes de 2000 kw; un des groupes est toujours considéré comme de réserve.

Les groupes transformateurs se composent d'un moteur synchrone triphasé à 2300 volts, 60 périodes, entraînant deux génératrices à 1500 volts situées de part et d'autre sur le même arbre à la vitesse de 600 t : m pour les groupes de 1500 kw et de 514 t : m pour les groupes de 2000 kw. A chaque extrémité se trouve une petite dynamo à courant continu, dont l'une sert d'excitatrice au moteur synchrone et l'autre d'excitatrice pour les dynamos à 1500 volts.

Les dynamos sont munies d'écrans isolants perpendiculaires à l'axe et d'écrans parallèles aux lames, ces écrans ayant pour résultat d'empêcher la production des flaches aux collecteurs.

Les groupes effectuent un travail très varié et fonctionnent fréquemment inversés, par suite de la récupération effectuée par les locomotives. Pour un train de 2500 tonnes, en palier, l'effort demandé est 6,55 tonnes à la vitesse de 38,5 km : h, soit 1000 kw. A la montée d'une rampe de 20 mm, avec deux locomoteurs, l'effort devient 50 tonnes à la vitesse de 22,5 km : h, soit 4100 kw; à la descente de la même pente, l'effort du train sur les locomoteurs est de 38,5 tonnes, les moteurs restituant à la ligne, à 26 km : h, une puissance de 2600 kw.

Diverses combinaisons sont employées pour l'excitation du moteur synchrone et des génératrices. Dans une de ces combinaisons, l'excitation du moteur synchrone est modifiée de façon à se faire sous 40 volts à demi-charge, 120 volts en surcharge de 300 pour 100 comme moteur, et 80 volts pour la même surcharge comme alternateur générateur. L'excitatrice est alors munie de deux enroulements shunt et deux enroulements série, avec diverses combinaisons et relais de sécurité.

Les dynamos génératrices sont excitées par une des deux petites machines et sont munies d'enroulements de compoundage, de compensation et de commutation; ces enroulements sont mis en série du côté terre. les enroulements de compoundage étant les plus

rapprochés de la terre et mis en parallèle avec ceux des groupes voisins par une barre d'égalisation, à la façon habituelle.

Les bâtiments des sous-stations sont établis en briques, sous une forme aussi simple et aussi économique que possible.

Certains groupes sont à ventilation propre, d'autres à refroidissement par un ventilateur indépendant.

Les groupes sont établis pour une élévation de température de 35° en pleine charge continue, de 60° pour une charge de 150 pour 100 pendant 2 heures; une charge de 300 pour 100 avec une tension réduite à 85 pour 100 aux bornes des moteurs, peut être supportée sans inconvénient pendant 5 minutes.

Les feeders à courant continu comportent des disjoncteurs à action rapide. Le rôle de ces appareils est de toute importance : l'un des inconvénients du courant continu à haute tension réside dans le danger de flaches aux collecteurs des dynamos, en cas de court-circuits violents. Ces flaches sont très destructifs et peuvent même prendre l'allure de véritables explosions : on les évite surtout par l'emploi de disjoncteurs très rapides qui coupent le circuit avant que le courant ait eu le temps d'atteindre une valeur trop dangereuse.

LOCOMOTEURS.

Les locomoteurs (*fig. 22*) au nombre de 42 sont composés de deux unités; chaque unité du type 2-B-B, comporte un

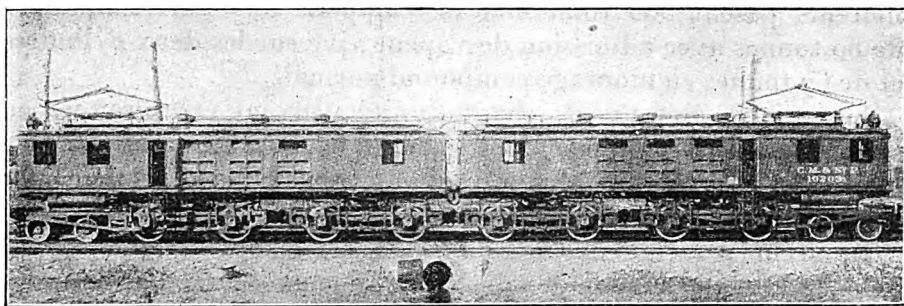


Fig. 22. — Vue d'ensemble d'un locomoteur à deux unités (3600 chx).

bogie porteur à deux paires de roues de 0,92 m, et quatre essieux, avec roues de 1,32 m, attaqués chacun par un moteur avec suspension par le nez et double engrenage cylindrique (un de chaque côté de l'armature), avec roues élastiques.

Les quatre essieux moteurs de chaque unité sont répartis en

deux trucs, dont l'un symétrique à deux essieux moteurs et l'autre dissymétrique à deux essieux-moteurs et deux essieux porteurs ayant un jeu possible de 10 cm de part et d'autre du centre.

Les moteurs sont du type GE.253 A, à quatre pôles, avec pôles auxiliaires, bobinage pour 1500 volts, isolement pour 3000 volts, d'une puissance unihoraire de 452 chevaux et continue de 396 chevaux, avec ventilation forcée de $70 \text{ m}^3 : \text{min}$; la vitesse est $446 \text{ t} : \text{m}$, à la charge unihoraire.

La puissance unihoraire du locomoteur entier est 3600 chevaux et son poids total 260 tonnes, soit 72 kg par cheval unihoraire; le poids adhérent est 204 tonnes, à raison de 25,5 tonnes par essieu.

Les locomoteurs à voyageurs et à marchandises se différencient par le rapport d'engrenage $\frac{29}{11}$ pour voyageurs, et $\frac{19}{82}$ pour marchandises, soit un rapport de 1,77 entre les deux types.

Pour le locomoteur à marchandises, l'effort de traction et la vitesse sont à la marche unihoraire, 38,5 tonnes et 24,6 km : h; l'effort de traction maximum, qui peut être maintenu pendant 5 minutes, sans échauffement dangereux, est d'environ 60 tonnes; la vitesse maximum des locomoteurs à voyageurs est 105 km : h.

A titre de comparaison, signalons que les grandes locomotives à vapeur Mallet, compound articulées, avec un poids total de 252 tonnes, et un poids adhérent de 146,5 tonnes sur six essieux-moteurs, développent un effort de 24,5 tonnes en remorquant un train de 1800 tonnes dans des rampes de 10 mm, et que les dernières machines les plus puissantes de ce type, à 10 essieux-moteurs pèsent 305 tonnes et développent un effort maximum de 80 tonnes avec admission de vapeur vive sur les deux cylindres et de 67 tonnes en montage compound normal.

Les quatre moteurs de chaque unité peuvent être groupés en série, ou en série-parallèle (deux groupes de deux en parallèle), une troisième vitesse est obtenue, dans ce dernier groupement, par shuntage des inducteurs à 50 pour 100.

Le circuit principal de traction (voir le schéma de la figure 23) est indépendant sur chacun des deux demi-locomoteurs. Il comprend les résistances de démarrage (en forme de grilles sur des isolateurs spéciaux pour 3000 volts, avec ventilation par six cheminées d'appel), les contacteurs de manœuvre et les moteurs.

Le contrôleur comporte 17 crans pour la marche en série et 15 crans pour la marche en parallèle, le dernier cran correspondant au shuntage des inducteurs. Le passage série parallèle se fait sans choc, ni chute de l'effort de traction, par 7 crans de transition.

Les locomoteurs à voyageurs comportent au centre une chaudière à huile pour le chauffage du train. L'éclairage du train est assuré par des batteries d'accumulateurs placées dans chaque wagon et

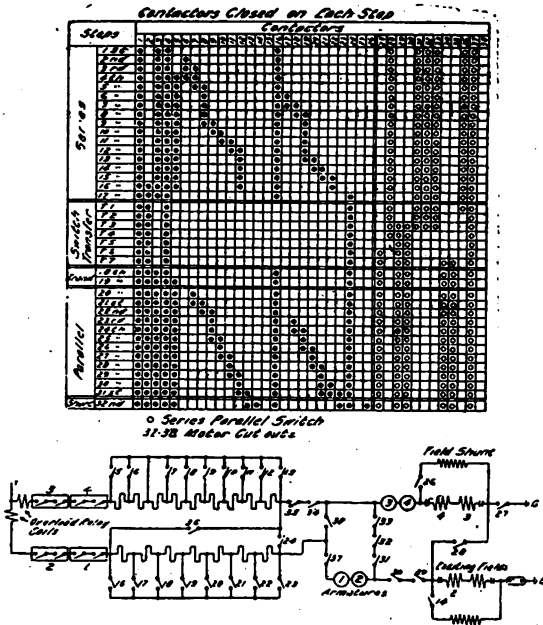


Fig. 23. — Schéma simplifié des circuits de traction.

chargées sur un circuit alimenté par une dynamo du moteur générateur.

Récupération. — Les locomoteurs sont munis d'un freinage avec récupération dont le schéma est donné dans la figure 24, pour le cas de la marche en série des moteurs.

Le principe consiste dans l'emploi d'une excitatrice spéciale à deux collecteurs indépendants, chaque collecteur fournissant une surexcitation des champs d'un groupe de moteurs. Pour passer de la marche en moteur à la marche en récupération avec ce système, on n'a pas à modifier le sens des connexions des inducteurs aux armatures des moteurs, comme dans le freinage rhéostatique usuel. Le sens normal du courant, dans les inducteurs, pendant la marche en moteur, avec les contacteurs A et B ouverts, est celui des flèches marquées I'; si l'on ferme les contacteurs A et B et que l'on fasse débiter par l'excitatrice dans les inducteurs un courant supplémentaire croissant dans le même sens, la force électromotrice

des moteurs augmente, atteint la valeur de la tension du réseau et la dépasse : à ce moment, le courant s'inverse dans les moteurs qui fonctionnent en génératrice, débitant sur la ligne un courant I ; comme ce courant circulerait dans les inducteurs en sens inverse du courant d'excitation nécessaire I' , il faut, pour maintenir le régime, que l'excitatrice débite un courant $I + I'$, somme du courant récupéré et du courant d'excitation.

Pour que le fonctionnement soit stable, il faut que les géné-

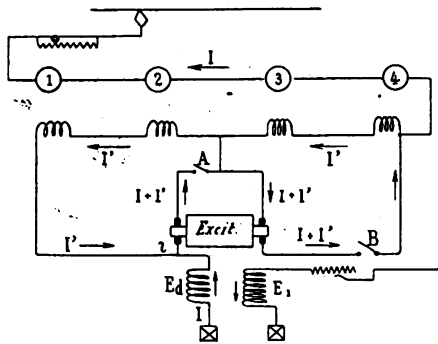


Fig. 24. — Schéma de la récupération en courant continu.

ratrices ainsi excitées et débitant sur le réseau aient une caractéristique shunt, avec tension aux bornes diminuant lorsque le courant débité augmente. Dans ces conditions, en effet, un à-coup quelconque entraînant une augmentation du débit, par exemple une baisse de la tension du réseau, amène une baisse de la force électromotrice de la génératrice, et redonne ainsi une nouvelle position d'équilibre stable, à une tension plus faible.

Dans le montage adopté ici, le courant récupéré se retranche dans l'inducteur des génératrices du courant débité par l'excitatrice, ce qui amène déjà une caractéristique de tension forcément inclinée, mais on a renforcé cette action en munissant l'excitatrice d'un enroulement inducteur différentiel E_d , en plus de l'inducteur à excitation séparée qui permet le réglage de la récupération.

En pratique, la marche en récupération peut se faire, soit avec les moteurs en série, soit avec les moteurs en parallèle (on ne peut toutefois passer d'un mode de groupement à l'autre pendant la récupération). Elle est commandée par une manette (située au-dessus de la manette principale du contrôleur) laquelle manette

commande le réglage par résistance de l'enroulement inducteur principal E' de l'excitatrice.

Un relais de tension règle la fermeture du circuit sur le réseau quand la tension des génératrices est suffisante, et un relais limiteur du courant r intercalé entre le contrôleur principal et le contrôleur de champ d'excitatrice commande automatiquement la récupération et permet la marche en unités multiples avec d'autres locomoteurs. Un ampèremètre, avec zéro au milieu, indique au wattmann le courant récupéré ou absorbé, et un second ampèremètre, le courant dans le champ des moteurs, avec fixation des limites à ne pas dépasser. Grâce à leur puissance continue voisine de la puissance unihoraire, les moteurs ne fatiguent pas par l'emploi de la récupération.

Indépendamment de ce freinage électrique, les locomoteurs sont munis d'un frein à air comprimé Westinghouse, à deux robinets dont l'un commande le freinage du seul locomoteur et l'autre le freinage de l'ensemble du train, ce qui est très utile pour le démarrage des longs trains à accouplement automatique, usités en Amérique.

La conduite d'un train de 2700 à 3200 tonnes vers l'Est depuis Deer Lodge se fait de la façon suivante. Un seul tracteur suffit jusqu'à Butte, à l'entrée de la section, la plus dure dans ce sens, où l'on attelle un deuxième locomoteur : on a commencé par l'atteler en queue, on le place maintenant au milieu du train, aussi bien pour la montée que pour la descente, où il eût pu paraître préférable de mettre les deux machines en tête, fonctionnant en unités multiples.

La présence de deux robinets de frein sur le locomoteur, avec freinage indépendant de ce dernier, facilite le démarrage dans les rampes : on desserre d'abord les freins des wagons, encore retenus par le frein du tracteur, puis seulement les freins de ce dernier après avoir amené la manette principale sur le premier ou le deuxième cran de marche ; le mécanicien du deuxième tracteur démarre à son tour quand l'inspection de l'attelage lui montre qu'il va être traîné.

A la descente de la rampe de 20 mm de Donald, on se sert du dispositif automatique de retenue des freins des wagons qui les maintient serrés malgré les fuites, pour le quart des wagons du train, en complétant par la marche en récupération. Sur les pentes plus légères, on ne se sert que de la récupération avec des vitesses de 27 à 50 km : h, moteurs en parallèle ; on peut récupérer également en série de 15 à 28 km : h ; la vitesse maximum de marche des locomoteurs à marchandises est de 50 km : h.

RÉSULTATS ÉCONOMIQUES OBTENUS.

Résultats économiques obtenus. — Les résultats indiqués dans la presse technique, pour l'exploitation électrique de la section Harlowton-Deer Lodge pendant le trimestre octobre-décembre 1916 comparée avec l'exploitation à vapeur du même trimestre en 1915, ont été extrêmement remarquables.

Le service a été fait avec 7 locomoteurs électriques au lieu de 13 locomotives à vapeur, pour les voyageurs, avec une même nombre de 119 300 trains-milles, et pour les marchandises, 15 locomoteurs ont traîné 364 millions de tonnes-milles américaines, alors qu'il avait fallu 43 locomotives pour 283 millions de tonnes-milles, l'année précédente.

La consommation *aux usines* a été de 27 w-h par tonne-kilomètre (métrique) remorquée, ce qui est un résultat extraordinaire dans une ligne de montagne; en comparaison de 59 w-h sur la ligne de Giovi, 42 w-h sur les lignes de la Walteline et 74 w-h au Lötschberg.

1 kw-h a remplacé un peu moins de 5 kg de charbon, en service voyageurs, et un peu plus de 3 kg, en service marchandises;

1 locomoteur a fait le service de deux locomotives à vapeur, en service voyageurs, et de trois, en service marchandises.

Ajoutons qu'au lieu de quatre sections d'exploitation à vapeur, la ligne totale ne comporte plus que deux sections d'exploitation électrique; les points d'arrêt, ateliers et dépôts intermédiaires de Three Forks et Alberton ont été supprimés.

Une économie de temps de 20 pour 100 a été réalisée sur les trains de marchandises.

Il est à remarquer que la ligne a un fort trafic : environ 1,6 million de tonnes du parcours total, par trimestre, soit 6,4 millions par an.

En ce qui concerne la récupération, on estime qu'en novembre 1916 la quantité d'énergie récupérée a été de 11,3 pour 100 de l'énergie totale consommée aux moteurs : on a observé que, sur la pente de 20 pour 100, la puissance récupérée dans les trains de voyageurs, était égale à 42,8 pour 100 de la puissance consommée à la montée, aux bornes des moteurs.

Le personnel des ateliers a pu être réduit considérablement.

EXTENSION DE L'ÉLECTRIFICATION DU CHICAGO MILWAUKEE
AND SAINT-PAUL R-R.

L'électrification d'un deuxième tronçon de ce réseau (dans les Cascade Mountains) est en cours d'exécution sur une longueur de 350 km, presque entièrement à simple voie, Othello-Seattle-Tacoma.

Les fournitures de l'installation ont été commandées, à la fois à la General Electric Company et à la Westinghouse Electric and Manufacturing Company, soit pour la première, 5 sous-stations et 7 locomoteurs; pour la seconde, 3 sous-stations (Kittitos, Doris et Taunton) et 10 locomoteurs. Il s'agit là de locomoteurs à voyageurs de types nouveaux, spécialement établis pour ce service, alors que jusqu'ici on s'était servi, à cet usage, de locomoteurs à marchandises, munis d'un rapport d'engrenages différents.

Ces locomoteurs devront pouvoir remorquer un train de 12 wagons en acier (960 tonnes) à 40 km : h dans des rampes de 22 pour 1000 et à 96 km : h en palier.

Locomoteurs de la General Electric Company. — La General Electric Company doit livrer 5 locomoteurs à voyageurs (2 des 7 indiqués plus haut sont du type de manœuvre) de 3260 chevaux unihoraires et 2760 chevaux continus. Ces locomoteurs seront imités de ceux du New-York Central, du type dit *Gearless* ou sans engrenage, mais comporteront 12 moteurs bipolaires au lieu de 8, à induit directement calé sur l'arbre et inducteur à entrefer vertical; les 12 essieux moteurs seront complétés par un essieu porteur à chaque extrémité.

Le poids non suspendu sur chaque essieu est de 4,3 tonnes, le poids total du locomoteur est 242 tonnes, dont 208 adhérentes, soit 17,3 tonnes par essieu et 57 kg par cheval unihoraire.

L'effort de traction est de 21 tonnes à la charge unihoraire, 19 tonnes en charge continue, 25 tonnes pour le remorquage d'un train de 960 tonnes sur rampe de 20 mm et 41,5 tonnes, au démarrage sous coefficient d'adhérence 0,20 : l'accélération dans la rampe de 20 mm, avec le train-type sera 0,3 mille à l'heure par seconde 0,133 (m : sec : sec.)

Les moteurs sont établis pour 1000 volts, et fonctionneront par 12, 6, 4 ou 3 en série, ce qui, avec un shuntage de l'inducteur, donnera cinq vitesses normales, savoir : pour un train-type de

960 tonnes : en palier, 15; 29; 40,5; 49,5; 63 milles à l'heure; en rampe de 20 mm : 4; 11; 18; 25; 30,5 milles à l'heure.

La machine est en un seul élément (et non plus en deux demi-unités comme précédemment), mais la caisse est divisée en trois parties reposant chacune sur deux bogies de deux essieux-moteurs, sauf pour les bogies extrêmes qui comportent en plus un essieu-porteur.

Le constructeur annonce que l'excitation ne sera pas fournie par moteurs générateurs, pour la récupération, mais n'indique pas quel système il emploiera.

Locomoteurs Westinghouse. — Les 10 locomoteurs à voyageurs fournis par la Société Westinghouse seront à arbre creux, roue élastique et engrenages symétriquement attaqués par deux moteurs jumelés.

Le locomoteur du type 2—C—1+1—C—2, comporte à chaque extrémité deux paires d'essieux-porteurs et deux groupes de trois essieux-moteurs, séparés par deux essieux-porteurs au milieu.

Le poids total est 245 tonnes environ, dont 25 tonnes sur chacun des six essieux-moteurs et pour une puissance unihoraire de 3600 chevaux (12 moteurs de 300 chevaux) le poids par cheval est 68 kg.

La puissance continue est 3200 chevaux correspondant à un effort de traction de 22,3 tonnes à 39,5 km : h; l'effort maximum au démarrage est de 50 tonnes.

Les moteurs sont bobinés pour 750 volts et peuvent être couplés par 4, 6, ou 12 en série, ce qui, avec deux valeurs de shuntage des inducteurs, donne 9 vitesses, sans rhéostat.

Le tableau des 9 vitesses et des puissances absorbées est donné ci-dessous, pour un train de 600 tonnes, remorqué dans une pente de 8 mm :

Vitesses en kilomètres-heure : 17,7; 19,7; 22; 34,5; 39; 45; 54; 60; 67,5.

Puissances en kilowatts : 525; 570; 642; 1080; 1182; 1296; 1645; 1887; 2150.

RÉSUMÉ DES PROPRIÉTÉS CARACTÉRISTIQUES DU COURANT CONTINU A HAUTE TENSION.

Comme le monophasé, le continu n'exige qu'un fil de contact, au lieu de deux pour le triphasé. Les conditions de fonctionnement des collecteurs et l'impossibilité de transformer économiquement

la tension sur la machine, ne permettent pas d'adopter, en courant continu, une tension aussi élevée qu'en monophasé; après examen méticuleux de la question, les Américains ont choisi 3000 volts pour la plus importante électrification existant actuellement. La valeur plus faible de la tension occasionne une élévation notable de la dépense de cuivre dans la ligne.

Le moteur série à courant continu a une caractéristique sensiblement à puissance constante comme le moteur série monophasé; on peut, par la combinaison du changement de couplage série-parallèle et du shuntage de l'inducteur, régler sa vitesse dans de larges limites, avec un degré de continuité toutefois moindre que dans le moteur monophasé commandé par un transformateur de réglage; le démarrage et le passage d'un couplage à l'autre exigent l'introduction de résistances qui absorbent une certaine quantité d'énergie.

Bien que le moteur à courant continu à haute tension soit plus lourd que celui à basse tension, il reste encore supérieur au moteur monophasé comme rendement et comme capacité de surcharge.

Le plus grave inconvénient du système à courant continu est que l'énergie ne pouvant être produite directement sous cette forme, on est obligé de recourir à une transformation rotative, assez coûteuse de premier établissement, et qui entraîne une dépense d'énergie assez importante, surtout lorsque l'on est obligé de laisser tourner des groupes puissants, pendant de longues périodes de faible charge.

Comme contre-partie de cet inconvénient, se présente l'avantage que le courant continu de traction peut être emprunté à n'importe quelle distribution d'énergie existante, tandis que les systèmes monophasé et triphasé ne permettent d'éviter la transformation rotative que par l'établissement de centrales spécialisées, dont l'énergie ne peut être à son tour échangée avec les distributions normales qu'avec transformation rotative.

Les résultats obtenus en Amérique, d'après la littérature technique, montrent que, grâce au bon rendement et à la grande capacité de surcharge des groupes transformateurs et des moteurs de traction à courant continu, on arrive à réduire suffisamment les pertes de la distribution, pour réaliser, au moins avec les grands trafics existants dans ces installations, un rendement de traction remarquable, et même si élevé qu'on peut à peine le concevoir.

Il est également indiqué, dans la littérature technique, que le fonctionnement des installations est très bon, qu'on n'a pas à souffrir du grand ennemi qu'est le coup de feu au collecteur ou

« flache » et que la récupération se fait très bien jusqu'à des vitesses descendant au quart de la vitesse normale.

Aussi la mission d'études en Amérique se propose-t-elle d'examiner dans le détail le fonctionnement de ce système qui semble présenter le plus haut intérêt : c'est d'ailleurs seulement avec les documents rapportés d'Amérique à ce sujet, qu'il sera possible de formuler un jugement sérieux sur ce mode de traction.

CONCLUSIONS.

Au cours de ce travail, après avoir indiqué les grandes lignes du programme d'électrification partielle de notre réseau ferré, nous avons passé successivement en revue les systèmes de traction électrique de grandes lignes, triphasé, monophasé et monotriphasé, courant continu à haute tension, et nous avons, pour chacun d'eux, donné, comme conclusion, le résumé des propriétés caractéristiques.

Nous avons pu étudier à fond le triphasé et le monophasé direct, dont nous avons près de nous, respectivement en Italie et en Suisse, les applications les plus perfectionnées; par contre, en ce qui concerne le monotriphasé et le continu à haute tension, dont il n'existe d'applications qu'en Amérique, nous avons dû nous borner à indiquer ce qui a été publié dans la *Littérature technique*.

Une Mission d'études va partir incessamment en Amérique pour procéder, sur place, à une enquête minutieuse et complète sur ces deux derniers modes de traction. Nous avons cru cependant préférable de communiquer au public électricien les renseignements déjà acquis, et de poser, dès maintenant devant lui, le problème de l'électrification partielle de nos chemins de fer.

Mais il ne saurait être question de formuler des conclusions sur la valeur respective des divers systèmes de traction, avant que ne soit terminée l'étude actuellement en cours.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

La corona dans l'hydrogène, et le redressement des courants alternatifs,

par J.-W. DAVIS et C.-S. BREESE (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, février 1917).

Ceci est une étude des effets corona entre un fil et un cylindre concentrique, dans une atmosphère d'hydrogène. La tension continue utilisée dans ces expériences fut obtenue au moyen d'une batterie de 40 génératrices à courant continu de 500 volts-250 watts, excitées en dérivation, chaque génératrice étant montée sur une base isolante et les diverses machines étant entraînées à l'aide d'accouplements isolants. Des essais furent également effectués avec des tensions alternatives fournies par un groupe de transformateurs statiques. Les fils disposés dans les tubes avaient de 0,12 mm à 1,59 mm de diamètre, et dans la plupart des essais, le tube extérieur présentait un diamètre de 4,45 cm. Les tubes furent remplis d'hydrogène purifié avec soin, et pourvus de moyens propres à faire varier la pression du gaz. On reconnut que le percement du diélectrique gazeux, et l'apparition d'une lueur à la surface du fil, étaient simultanés, alors que le voltage était porté à la valeur dite *critique*. Or, pour l'hydrogène, le voltage critique E est donné par la formule

$$E = E_{0p} + C\sqrt{p},$$

où p est le pourcentage de la pression atmosphérique et E_0 et C sont des constantes. Cela confirme la loi de Peck relative à la variation de la tension avec une dimension de fil donnée, mais la formule de Peck relative à la variation du rayon r du fil

$$E = E_{0p} \left(1 + \frac{b}{\sqrt{pr}} \right),$$

où b est une constante, n'a pas été sanctionnée d'une manière décisive pour l'hydrogène; toutefois, les résultats obtenus indiquent que cette formule peut être maintenue. Avec l'air, on a reconnu que E est plus faible quand le fil est positif que lorsqu'il est négatif.

Dans le cas de l'hydrogène, c'est l'inverse qui a été constaté. De plus, la valeur de E est beaucoup plus faible avec l'hydrogène qu'avec l'air. Il semble qu'avec l'hydrogène la corona persiste à des tensions moindres que celles nécessaires pour amorcer la décharge, et l'on remarque que les courants de corona diffèrent selon qu'ils sont observés avec des voltages croissants ou décroissants. Des courbes montrent les intensités de corona pour des voltages croissants et décroissants, et pour divers diamètres de fil. Les voltages auxquels la corona commence à apparaître, avec voltages croissants et fil positif, sont les suivants :

Fil de cuivre de 0,205 mm :

Dans l'hydrogène, à la pression de.....	50,6	102	201	394	724 mm
Dans tube de 4,45 cm, voltage de corona.	1200	1600	2400	3300	4800 volts

Fil de cuivre de 1,285 mm :

Dans l'hydrogène, à la pression de.....	323	423	530	627	728 mm
Dans tube de 4,45 cm, voltage de corona.	5900	7200	8400	9400	10400 volts

Une particularité de la corona dans l'hydrogène réside dans le fait que les intensités de corona diffèrent entièrement selon que le fil est positif ou négatif.

Dans le cas d'un fil de 0,121 mm de diamètre, à la pression de 736 mm, l'intensité de corona s'éleva brusquement à 26×10^{-4} ampère, pour 2600 volts, le fil étant négatif, tandis que le fil étant positif l'intensité monta lentement de 0 à 2×10^{-4} ampère, pour des tensions situées entre 3200 et 5600 volts. Pour des fils semblables dans l'air, il y a fort peu de différence entre les intensités de corona positives et négatives, ces intensités étant, respectivement, d'environ 0, 3×10^{-4} et 9×10^{-4} ampère, à 5000, 10000 et 14 000 volts. D'où il résulte qu'un redressement convenable peut être obtenu avec la corona dans l'hydrogène, ce qui est prouvé par des oscillogrammes. Le Mémoire se termine par un examen des phénomènes qui se rapportent à l'apparition de la corona dans l'hydrogène, en diverses circonstances.

Effets de dilatation considérés, comme cause de détérioration des isolateurs à suspension,

par J.-A. BRUNDIGE (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1917).

Divers groupes d'expérimentateurs ont émis deux hypothèses principales pour expliquer la détérioration des isolateurs en porcelaine: la porosité, et la fissure mécanique due aux effets de dilatation. Ces deux hypothèses sont examinées brièvement dans le Mémoire, et l'auteur fournit des données à l'appui de la seconde. Entre autres arguments, il mentionne que les conditions inhérentes au chapeau métallique des isolateurs à suspension, scollé au ciment, suffisent à expliquer (rien que par la dilatation due à la température) beaucoup des troubles constatés. Et la dilatation qui se produit dans le ciment même, par suite de l'absorption de l'humidité, est d'une nature beaucoup plus sérieuse encore. Nul doute que, pour vaincre la dilatation, on n'ait recours, entre autres moyens, à l'élimination du ciment de Portland, ce qui, incidemment, contribuera à simplifier les problèmes relatifs à la porosité.

Fonctionnement et entretien des câbles souterrains,

par J.-L. HARPER (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1917).

Les causes principales de défaillance des câbles sont les troubles dans les joints, les dommages mécaniques aux gaines de plomb, enfin l'excès d'échauffement. Ces causes sont analysées et la question des joints est examinée en particulier. L'auteur fait également part de son expérience au sujet des excès d'échauffement, et il suggère que, dans les endroits qui s'y prêtent, des systèmes de canalisation soient construits de telle sorte que les conduits puissent être noyés dans l'eau; les câbles fonctionneraient alors dans les conditions de câbles sous-marins.

Appareils de chauffage électrique basés sur l'induction magnétique,

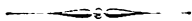
par A. PONZINI (*Elettrotecnica*, avril 1917).

Les appareils de chauffage, dans lesquels une résistance est chauffée par un courant, nécessitent l'isolement électrique de cette résistance par rapport à la masse à chauffer, qui, en général, est électriquement conductrice; et comme tout isolant électrique est un

mauvais conducteur de la chaleur, il s'ensuit que la différence de température entre les parties chauffante et chauffée est considérable. Cet inconvénient n'existe pas avec les appareils de chauffage du type basé sur l'induction magnétique, car dans ceux-ci le liquide à chauffer (qu'il soit électriquement conducteur ou non) est en contact direct avec la partie chauffante. Ces appareils comportent un transformateur électrique qui, fixé au fond du récipient contenant le liquide à chauffer, est recouvert d'une cloche métallique également fixée au fond du récipient. Un certain nombre de tubes métalliques passent entre les colonnes du transformateur, et à travers la cloche, aux parois de laquelle ils sont fixés. Des courants électriques sont donc engendrés dans les parois de la cloche ainsi que dans les tubes. Le liquide à chauffer est en contact direct avec l'extérieur de la cloche et avec l'intérieur des tubes : par suite, la différence de température entre les parties chauffante et chauffée est pratiquement nulle.

L'auteur soumet quelques exemples de tels appareils, lesquels ont un facteur de puissance élevé : 0,90 pour les appareils monophasés et 0,85 pour les appareils triphasés.

Lors de la *discussion*, on fit la remarque que les appareils à résistance se règlent mieux que les appareils à induction, mais que les seconds sont plus robustes que les premiers. D'autre part, il fut suggéré que, au lieu de se servir des parois de la cloche comme circuit secondaire, il serait préférable d'adopter un circuit séparé.



BIBLIOGRAPHIE.

L'Électrochimie et l'Électrometallurgie, par Albert LEVASSEUR; 1 vol. in-8 de 261 pages, avec 44 figures. Paris, H. Dunod et E. Pinat; 1917.

Comme l'indique sa Préface, ce livre est la rédaction d'une partie du cours d'Electrochimie et d'Electrometallurgie professé par l'auteur à l'Ecole d'Electricité et de Mécanique industrielles de Paris et à l'Ecole Bréguet.

L'Ouvrage comprend quatre Parties principales, subdivisées en Chapitres. La première Partie, sorte d'Introduction, rappelle brièvement au lecteur quelques connaissances générales relatives à la Thermodynamique, à la Physicochimie, aux vitesses des réactions, à la Thermochimie et à la Statique chimique. Puis, sous le titre : Théorie de l'Electrolyse, la seconde Partie traite des sept Chapitres suivants : Dissociation électrolytique; Lois de Faraday; Réactions secondaires; Migration des ions; Conductibilité des électrolytes; Forces électromotrices; Décomposition électrolytique et polarisation.

Et tandis que la troisième Partie est consacrée à l'Electrochimie et à l'Electrometallurgie par voie humide (Principes généraux, Industries des alcalis; du chlore et de ses composés; Affinage électrolytique du cuivre), la quatrième Partie traite de l'Electrochimie et de l'Electrometallurgie par voie sèche (Emploi de l'énergie électrique dans les industries considérées; Fours électriques et électrodes; Electrolyse ignée; Chimie et Métallurgie électrothermiques; Application de l'effluve électrique à la Chimie).

Pour réussir à condenser en un assez petit Volume une telle quantité de rubriques, l'auteur a su recourir à une méthode d'exposition remarquablement sobre et claire, et l'on peut dire de ce livre qu'il répond bien à son but essentiel : « permettre aux étudiants de résoudre dans les meilleures conditions les problèmes scientifiques et pratiques qui, dans l'industrie, se posent couramment à l'ingénieur. »

L'Éveil de l'Esprit public. Administration industrielle et générale, Prévoyance, Organisation, Commandement, Coordination, Contrôle. — Etudes publiées sous la direction de M. Henri FAYOL; 1 vol. in-8 de 289 pages. Paris, H. Dunod et E. Pinat; 1918.

Un certain nombre d'études, conférences, articles, etc., relatifs à la méthode d'Administration industrielle préconisée par M. Henri Fayol et quelques-uns de ses fervents disciples, ont été publiés de 1916 à 1918 et disséminés dans divers Bulletins, Journaux, Revues, etc. Il était évidemment utile de les réunir en un même Volume, où ils se présentent dans l'ordre ci-après :

Introduction théorique et pratique à l'étude de l'Administration expérimentale, par M. Paul VANUXEM;

Trois conférences de M. FAYOL : 1° *De l'importance de la fonction administrative dans le gouvernement des affaires* (Société d'Encouragement, novembre 1917); 2° *L'enseignement*

de l'Administration dans les Ecoles techniques supérieures (Société des Ingénieurs civils, novembre 1916); 3^o *La réforme administrative des services publics* (Cercle commercial et industriel de France, janvier 1918);

Conférence aux aspirants, sur *L'Administration au front*, par le lieutenant R. DESAUBLIAUX, et Lettre de M. L. DE MIJOLLA, sur le même sujet;

Article de M. G. LACHAPELLE : *Les idées de M. Henri Fayol* (Revue politique et parlementaire, juillet 1917);

Article de M. J. DAUTHEUIL : *Administration industrielle et générale* (Génie civil, novembre 1917);

Article de M. A. RENUCCI : *La réforme de notre Administration* (La France nouvelle, mars 1918);

Etc.

Dans sa très intéressante Préface, M. Henri Fayol expose la genèse de son œuvre (on pourrait dire, avec M. G. Lachapelle : son apostolat) qu'il poursuit sans interruption depuis plus d'un demi-siècle, et nourri des idées d'Auguste Comte et de Claude Bernard, il proclame l'excellence de la méthode expérimentale dans l'étude des questions sociales.

Les Industries électriques d'hier et de demain. — *L'enseignement de l'Électricité industrielle*, par Maurice SOUBRIER; 1 vol. in-8 de 214 pages. Paris, II. Dunod et E. Pinat; 1918.

Tous ceux qu'intéressent l'Électricité industrielle, son état actuel, son avenir et son enseignement, en France et à l'Étranger, liront avec le plus grand profit le Livre que M. Soubrier a écrit comme préface aux « Cours et Travaux pratiques d'Électricité industrielle du Conservatoire national des Arts et Métiers », cours dont il prépare d'ailleurs la publication.

Ce livre est non seulement riche en documents précis, de toute nature : techniques, économiques, financiers, commerciaux, ceux relatifs à l'enseignement, etc., mais il abonde en idées et en suggestions heureuses autant que pratiques. De fréquents parallèles entre ce qui existe chez nous et en d'autres pays ne sont pas toujours, hélas ! à notre avantage; mais c'est précisément là une source d'arguments irrécusables pour l'auteur, dont la constante préoccupation n'est autre que de favoriser l'essor des industries électriques en France après la guerre.

L'Ouvrage comprend les quatre Parties et les treize Chapitres mentionnés ci-après :

PREMIÈRE PARTIE : La production de l'énergie. — I. L'état actuel du réseau électrique français. — Son extension après la guerre. — Centrales à vapeur. — II. La houille blanche et les installations électriques. — III. Utilisation des gaz de fours à coke et hauts fourneaux. Charbons maigres.

DEUXIÈME PARTIE : L'Utilisation de l'énergie. — IV. La réorganisation des régions envahies. — V. Electrochimie. — Électrometallurgie : Fours à acier, Aluminium. — VI. La traction sur voies ferrées. — VII. L'éclairage, le chauffage, la tarification. — L'électricité en agriculture. — VIII. L'équipement électrique des ateliers, des ports, des gares, etc.

TROISIÈME PARTIE. *Le point de vue de l'organisation et du commerce.* — IX. L'organisation commerciale et technique des usines de construction. — X. Le commerce du matériel électrique. — La conquête des marchés extérieurs.

QUATRIÈME PARTIE. *La formation du personnel et de ses cadres.* — XI. L'apprentissage professionnel. — XII. L'enseignement technique supérieur et secondaire de l'électricité industrielle. — XIII. Les laboratoires nationaux et d'industrie. — Les offices de renseignement. — La librairie électrotechnique.

Dans ses « Conclusions », l'auteur résume ses principaux *desiderata* et, faisant appel aux savants, ingénieurs, capitalistes et industriels français, il les exhorte à la discipline et leur propose cette énergique devise : « Vouloir, organiser, réaliser ».

Enfin, c'est avec non moins d'intérêt et de profit qu'on relira, en *Annexe*, l'étude magistrale de M. André Blondel : « Sur quelques conditions à remplir pour l'organisation et la sanction d'un enseignement technique supérieur en France », étude qui apporte une contribution, si particulièrement autorisée, aux questions traitées dans le Chapitre XII du Livre de M. Soubrier.

ERRATUM.

(3^e série, t. IX, n° 78.)

Sur les machines à haute fréquence et leur réglage, par M. J. BETHENOD :

Page 173, ligne 1, au lieu de $\sqrt{R^2 + X^2}$, lire R.

IL Y A TRENTÉ ANS

Mai 1889. — Les machines dynamos, système Rechiniewski, par M. E. MEYLAN. — Le phonographe Edison, par M. CADIOU. — L'éclairage électrique du Palais-Royal, par M. A. VERNES.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 30 FR. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 32 FR.

Prix du numéro : 3 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de poste.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS,

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits.

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine) et à LYON.

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

Pour la *Commande de :*

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines
installées en France
par la **Compagnie Electro-Mécanique**
et ses Licenciés,

plus de 1.200.000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Stations Centrales.

Transports de Force.

Traction électrique par courant
continu et par courant alternatif.

Éclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminaires.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

ACCUMULATEURS ELECTRIQUES

FULMEN

Bureaux et Usine : à CLICHY, 18, Quai de Clichy.

FILS ET CABLES POUR L'ÉLECTRICITÉ

R. ALLIOT & ROL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

38, rue de Reuilly, 38

PARIS

TÉLÉPHONE

CABLERIE DE JEUMONT

TUBES ISOLATEURS ISOLANTS MOULÉS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du mercredi 4 juin 1919 : Admission de Membres titulaires, p. 367. — Sur certains modes d'emploi du collecteur en courant polyphasé (M. Gratzmuller), p. 369. — Les systèmes actuels de télégraphie rapide (Expériences) (M. Montoriol), p. 385.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 434.

BIBLIOGRAPHIE, p. 440.

LISTE DES OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ, p. 441.

IL Y A TRENTE ANS, p. 442.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 4 juin 1919 (1).

PRÉSIDENCE DE M. GUILBERT, VICE-PRÉSIDENT.

La séance est ouverte à 20 h 40 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des ouvrages offerts à la Bibliothèque de la Société (voir p. 441) et des demandes d'admission suivantes :

MM.

Bidault (Edmond-Michel), Élève à l'École supérieure d'Électricité, rue de Verrüe, à Saint-Vaast-la-Hougue (Manche). — Présenté par MM. Chaumat et Bertail.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

MM.

Darrius (Georges-Jean-Marie-Eugène), Ingénieur à la Compagnie électromécanique, 20, rue du Regard, à Paris. — Présenté par MM. Ehrmann et Schwarberg.

Larnaude (Jean-Charles-Louis), Ingénieur à la Compagnie française pour la fabrication des lampes électriques à incandescence, 9, avenue Malakoff, à Paris. — Présenté par MM. Chaumat et Larnaude.

Widmer (Albert), Directeur technique de la Compagnie électromécanique, 12, rue Portalis, à Paris. — Présenté par MM. Lestrade et Ehrmann.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

SUR CERTAINS MODES D'EMPLOI DU COLLECTEUR EN COURANTS POLYPHASÉS.

M. GRATZMULLER. — « La présente Communication aurait pu être faite il y a 15 ans, car elle n'invoque que des textes remontant à 1903 et 1904.

» Elle a d'ailleurs été présentée en juillet 1914, mais la déclaration de Guerre en a arrêté la publication.

» Notre secrétaire général, M. Joly, m'a conseillé de reprendre à nouveau la parole. Je me suis efforcé de ramener les questions à leurs lignes essentielles, en négligeant volontairement les phénomènes accessoires pour tâcher de rendre l'exposé plus intuitif.

» On verra en effet que la base des raisonnements est la notion de couple électrodynamique moteur ou résistant.

» En énonçant quelques principes généraux, mon but est de rappeler deux modes d'emploi du collecteur pour obtenir :

» 1^o L'autoexcitation et éventuellement le compoundage dans la marche en alternateur moteur ou générateur synchrone ou asynchrone;

» 2^o L'autoexcitation totale ou partielle et la vitesse variable à un glissement près dans la marche en moteur.

» Le transformateur statique est la cause du succès des courants alternatifs puisqu'il permet, à l'aide d'un appareil statique, d'élever la différence de potentiel de transmission de la puissance et de l'abaisser de même au point d'utilisation.

» Mais, c'est la découverte des moteurs alternatifs polyphasés sans collecteur à lames et principalement du moteur asynchrone qui a assuré le développement des courants polyphasés dans le passé. Probablement, elle justifiera leur existence pendant longtemps encore dans l'avenir.

» La fortune de ces moteurs est due à ce qu'ils peuvent faire leur champ sans utiliser le collecteur à lames et sans condensateurs, en empruntant de la puissance magnétisante au réseau.

» Néanmoins, il y a une question d'ordre de grandeur justifiant d'envisager la présence du collecteur pour diminuer, dans certains cas, la puissance magnétisante absorbée par exemple, pour des installations comportant de gros moteurs asynchrones à faible vitesse, soit aussi pour obtenir la vitesse variable.

» On peut énoncer, croyons-nous, le principe suivant :

» En supposant la perméabilité constante et sans aimants permanents, sans condensateurs, sans collecteurs à lames, ou résistance variable, il est impossible :

» 1^o de supprimer l'absorption de puissance magnétisante par un alternateur ;

» 2^o d'obtenir pour un même couple avec une alimentation à fréquence constante, une vitesse progressivement variable sans modifier les connexions des enroulements et sans introduire, dans des résistances variables, des pertes supplémentaires égales au produit de la puissance transmise au rotor par le glissement du rotor dans le champ du stator.

» La première partie de l'énoncé a été démontrée par M. H. Poincaré, il y a 12 ans, en s'appuyant sur les lois de l'induction, la deuxième partie doit pouvoir être démontrée d'une manière analogue.

I. — Quelques principes fondamentaux du dimensionnement du collecteur en courants alternatifs.

» Les inventions que nous présentons ou rappelons ont leur origine, en ce qui nous concerne, dans notre conception des conditions nécessaires pour obtenir une bonne commutation. Nous les rappelons brièvement :

» *La faculté destructive d'un arc dépend de l'énergie mise en jeu dans cet arc. Aucun courant parasite dangereux, soit sous balais et entre lames, soit entre le balai quittant apparemment une lame et cette lame ne pourra s'amorcer ou tout au moins atteindre une valeur mettant en jeu une énergie dangereuse, si, la différence de potentiel entre deux lames consécutives pour toutes lames touchant un balai, ne dépasse une certaine valeur ε , étant entendu qu'un balai touche au plus un nombre déterminé de lames.*

» Par suite, pour dimensionner une machine :

» On ne cherchera pas à chaque instant à déterminer la densité de courant en chaque point de la surface de contact d'un balai, problème, pensons-nous, dépourvu de sens.

» On supposera le problème résolu en négligeant les courants à éviter que nous appellerons *parasites*. On donnera au balai une section suffisante pour le passage des courants utiles avec une

densité *moyenne* acceptable. Ensuite on estimera la différence de potentiel entre lames consécutives sous balais à un instant quelconque.

» Si cette différence de potentiel est inférieure à ϵ , nombre expérimental, les courants parasites seront négligeables et la machine commutera bien.

» D'autre part, nous avons dit :

» *Dans un enroulement, muni d'un collecteur à lames, le problème de la substitution des sections aux balais n'est autre que celui du changement de nombre de spires au secondaire d'un transformateur ou de la commutation aux touches d'un régulateur de tension d'accumulateur. L'importance des connexions résistantes s'en déduit immédiatement.*

» En observant la condition énoncée que la différence de potentiel entre deux lames consécutives soit inférieure à ϵ , on conçoit que les balais frottant sur un collecteur à lames, à distances angulaires variables, peuvent servir à capter des différences de potentiel de phases et de grandeur variables, les lames étant reliées aux sections d'un enroulement du genre *Gramme* placé dans un champ tournant.

» Ce sont ces différents points de vue, conséquences des essais que nous avons effectués il y a 16 ans à la Thomson-Houston, qui sont à la base des dispositifs que nous allons maintenant exposer et qui ont été décrits ou brevetés en 1903 et 1904.

II. — Dispositif d'avanceur de phase. Capacité rotorique polyphasée.

» Dans le numéro du 22 février 1913, la *Lumière électrique* a publié une analyse d'un article de A. Scherbius paru le 17 octobre 1912 dans l'*Electrotechnische Zeitschrift*. Miles Walker, le distingué ingénieur de la British Westinghouse, a également fait diverses publications sur le même sujet.

» Il ne me paraît pas dénué d'intérêt de vous signaler, Messieurs, que j'ai déjà décrit le principe d'un appareil procurant à ses bornes des tensions analogues à celles de condensateurs convenablement disposés, à la séance de janvier 1903 de la *Société française des Électriciens* dans cette salle où nous sommes réunis.

» Il est absolument identique à l'avanceur de phase de A. Scherbius. Son emploi a été prévu pour les machines asynchrones. Il n'a pas été breveté, car il m'avait semblé résulter trop directement :

» 1^o Des travaux de Maurice Leblanc sur les machines asynchrones pour la transformation du travail mécanique en énergie électrique, ou inversement sans absorption de courants déwattés;

» 2^o Des travaux de Görges.

» J'ai d'ailleurs eu des scrupules exagérés sur la validité d'un brevet puisque Maurice Leblanc lui-même a breveté l'appareil ultérieurement.

» J'ai fait mention d'un appareil que je considérais comme évident, uniquement comme introduction à la description d'une autre machine.

» Voici les termes exacts de ma Communication de 1903 devant la *Société française des Électriciens* :

» *Parmi les idées fécondes en conséquence émises par M. Leblanc est celle de la génératrice asynchrone de courants polyphasés. Cette machine est fondée sur le principe suivant :*

» *Si un moteur d'induction est branché sur une distribution de courants alternatifs, il suffit de faire tourner le rotor au-dessus de la vitesse de rotation du champ pour fournir au réseau des courants wattés, tandis que le réseau lui-même doit fournir des courants magnétisants. M. Leblanc a montré que ces courants magnétisants peuvent être fournis par le rotor lui-même, à condition de fermer ses enroulements sur des capacités ou sur tout autre appareil jouant le rôle de capacité.*

» *Par exemple, on peut fermer les circuits du rotor sur un induit à courant continu extérieur à la génératrice asynchrone à q phases par q balais distants de $\frac{2\pi}{q}$, à condition de faire tourner l'induit plus vite que le champ tournant engendré par les courants eux-mêmes.*

» *Naturellement l'induit doit être entouré de fer pour diminuer la réluctance du milieu. Le fer peut être fixe ou tourner avec l'induit.*

» Il me semble bien avoir ainsi défini (*fig. 1*) l'appareil de A. Scherbius. Mais cette présentation ne revendiquait pas le rôle d'inventeur que je croyais sans aucun mérite. Puisque de nombreux auteurs en ont réclamé la paternité, je crois qu'elle m'appartient.

» J'avais d'ailleurs expérimenté en 1902 pour contrôler ce raisonnement aux ateliers Thomson-Houston. Comme moyen de fortune, pour fermer le circuit magnétique, nous avons réalisé un gros cerclage en fil de fer autour de l'induit.

» Quant à la disposition consistant à bobiner dans des trous poinçonnés dans des tôles d'un seul morceau, il a été décrit dans un brevet et exécuté en 1904. La description se trouve dans le brevet de la deuxième machine décrite plus loin.

» De plus, étant Ingénieur en chef à la Westinghouse, j'ai pu expérimenter quelques appareils avec MM. Joseph, Gaude, qui étaient alors avec M. Hermann jeunes stagiaires à la Westinghouse au Havre. J'ai utilisé le principe des connexions résistantes.

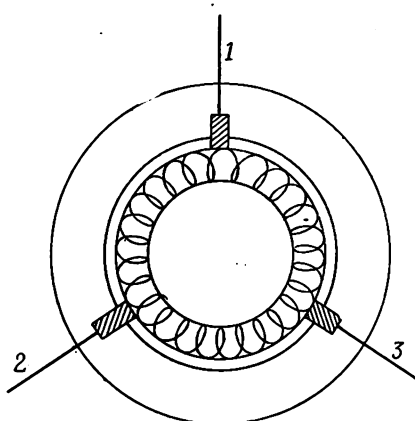


Fig. 1. — Capacité rotorique polyphasée.

» Le point faible de cet appareil est le bas voltage mis en jeu au collecteur par suite de la faible valeur nécessaire pour ϵ . On aboutit à des collecteurs ayant par suite une grande surface frottante. Les chutes ohmiques aux balais d'une part et les pertes par frottement de balais absorbent une puissance très appréciable.

» L'intérêt des connexions résistantes pour augmenter ϵ doit donc être pris en considération et nous les avons utilisées.

» De plus, il y a intérêt à refroidir le collecteur par ventilation en utilisant au besoin des ailettes.

» Maurice Leblanc a d'ailleurs, d'une manière indiscutablement indépendante, breveté, postérieurement à ma conférence et à une date très voisine, le même avanceur de phase. Mais il a ajouté quelque chose de plus, qui revient à la mise en cascade d'un moteur d'induction avec un moteur série à collecteur.

Le nom de *capacité rotorique polyphasée* convient, nous semble-t-il, à l'appareil ayant de si nombreuses paternités.

III. — Condition fondamentale de la production électrodynamique d'un couple dans une machine à enroulements statorique et rotorique avec réductance uniformément répartie circulairement.

» On sait que, dans l'hypothèse d'une répartition sinusoïdale du flux propre du stator et du flux propre du rotor, on peut repré-

senter le flux propre du rotor par un vecteur OR, le flux propre du stator par un vecteur OS.

» Nous admettrons que le flux résultant est représenté par la somme géométrique de OR et de OS (fig. 1).

» Pour abréger l'exposé déjà trop long, nous négligerons les fuites, non pas qu'elles soient négligeables, mais elles n'interviennent pas essentiellement.

» D'ailleurs les théories de M. Blondel permettraient facilement d'en tenir compte.

» Nous supposons pour l'exposé la machine bipolaire.

» L'expression du couple dans la machine est

$$C = KR \Phi \sin \widehat{\Phi OR}$$

ou

$$C = K'RS \sin \widehat{ROS},$$

K et K' étant des constantes convenables.

» Si les flux OR et OS tournent à la même vitesse, le couple est constant. C'est le cas qui nous intéresse.

» Nous compterons positivement les angles dans le sens de la flèche f , et nous supposons que le rotor tourne lui-même précisément dans ce sens.

» Le couple est moteur ou résistant suivant que OR précède ou suit O Φ .

» L'expression (I) du couple montre que sa valeur ne dépend

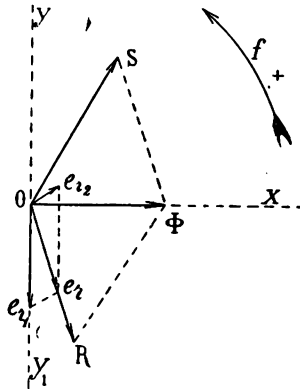


Fig. 2. — Couple moteur.

que de la projection de OR sur la direction OY perpendiculaire à O Φ , pourvu que O Φ reste constant. Lorsque l'enroulement

statorique est branché sur le réseau en dérivation, cette dernière condition se trouve pratiquement réalisée.

» Par suite, pour un même couple, les projections de OS et OR sur OX peuvent être quelconques, pourvu que la somme de leurs projections sur OX soit toujours égale à $O\Phi$. On peut donc fournir totalement la puissance magnétisante par le stator ou le rotor ou partiellement par les deux.

» Autrement dit, les ampères-tours magnétisants absorbés par

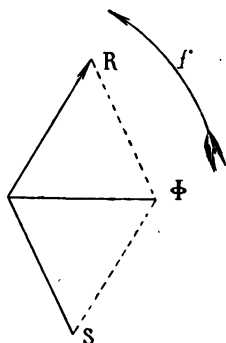


Fig. 3. — Couple résistant.

le stator ou par le rotor peuvent être quelconques pourvu que leur somme géométrique soit constante.

» Au contraire, les ampères-tours wattés du stator et les ampères-tours du rotor, c'est-à-dire leurs projections sur OY, sont toujours égaux et de signes contraires.

» *a.* Si l'on admet des points variables de pénétration des courants dans l'enroulement du rotor, on a les moteurs à collecteur et la fréquence des courants d'alimentation du rotor peut être quelconque, la distance angulaire $\widehat{ROS}$ pouvant être conservée en maintenant toujours convenablement à chaque instant la position des balais sur le collecteur.

» Comme cas particulier on peut, avec des balais fixes au rotor, alimenter le rotor à la fréquence du réseau, d'où résultent les moteurs à collecteur shunt ou série de Görges, dont les principes de fonctionnement ont été exposés par lui avec une admirable clarté.

» Il a signalé que la tension induite par spire dans les enroulements du rotor est proportionnelle au glissement, s'annule au synchronisme pour croître à nouveau en signe contraire aux vitesses hypersynchrones. Il en a conclu la bonne commutation au synchro-

nisme et la possibilité d'un facteur de puissance élevé que l'expérience lui a confirmé en 1891.

» *b.* Si, au contraire, on choisit des points constants du bobinage pour l'entrée des courants dans le rotor en employant des bagues collectrices, pour maintenir la constance de l'angle ROS, il faut choisir à chaque instant la fréquence, la phase et la grandeur des courants à introduire dans les bagues. On peut fournir avantageusement la puissance magnétisante au rotor à la pulsation $\omega_s - \omega_r$ si ω_s et ω_r sont respectivement la pulsation statorique et la vitesse angulaire rotorique.

» Nous envisagerons deux cas différents :

» 1^o On fournit par le rotor des courants magnétisants. Il faut alors disposer dans les circuits du rotor une différence de potentiel e_{n_1} qui, composée avec la force électromotrice e_n de glissement dans le champ $O\Phi$, donne une force électromotrice e_n en phase avec OR (*fig. 2*), la projection orthogonale de OR sur $O\Phi$ étant égale totalement ou partiellement à $O\Phi$. Cette force électromotrice e_{n_1} peut être obtenue par des condensateurs, ainsi que l'a démontré Maurice Leblanc, lorsque le rotor tourne au-dessous du synchronisme dans la marche en moteur et au-dessus du synchronisme dans la marche en générateur de puissance électrique.

» 2^o Si, au contraire, on veut modifier le glissement, il faudra compenser la variation de e_{n_1} qui en résulte. Cela pourra s'obtenir en modifiant les résistances des circuits du rotor. Celles-ci ne pouvant devenir ni nulles, ni négatives, le moteur ainsi équipé ne peut tourner au-dessus du synchronisme, ni même rigoureusement au synchronisme.

» Nous verrons plus loin d'autres procédés de variation de la vitesse par des modes d'obtention différents de e_{n_1} .

» De plus si la différence de potentiel e_{n_1} est procurée par des condensateurs, nous savons qu'elle est proportionnelle à la charge. Une telle machine ne peut donc pas avoir un facteur de puissance indépendant de la charge. On peut simplement s'arranger pour que son facteur de puissance soit égal à 1 à une certaine charge. C'est, sous une forme différente, l'exposé des résultats proposés par Maurice Leblanc en 1898-1899 et auxquels j'ai fait allusion pour l'exposé de la capacité rotorique polyphasée de l'auteur. Nous constatons en passant une faiblesse de ce mode d'excitation : faculté magnétisante variable avec la charge.

IV. — 2^e Dispositif d'avanceur de phase.

» Les dispositifs que nous allons maintenant exposer se rapportent principalement au brevet n^o 349 248 du 24 novembre 1904 et à son addition. Il a pour titre : *Système d'alternateur moteur ou générateur synchrone ou asynchrone à vitesse variable.*

» A la vérité, je crois que, pour ce qui est du compoundage de l'alternateur générateur de courants alternatifs en marche synchrone ou asynchrone prévue au brevet, M. Blondel a l'antériorité.

» Quoi qu'il en soit, nous reconnaissons volontiers que les admirables travaux de M. Blondel, très souvent travaillés et annotés par l'auteur, lui ont été du plus grand secours et qu'il les consultera encore souvent. Ces publications de M. Blondel constituent en effet des *ensembles complets* et par cela même d'une grande valeur instructive. On y sent le désir d'être utile, ce qui n'exclut pas leur originalité. Il faut en être reconnaissant à M. Blondel.

» Pour ce qui est de la disposition à vitesse variable, nous la croyons originale, mais les travaux de M. Blondel contiennent néanmoins des idées directrices dont nous sommes partis.

» Nous ne discuterons pas le fonctionnement de l'alternateur synchrone compound à pôles saillants que l'auteur a expérimenté à la plate-forme de la Thomson-Houston et qui a été l'objet d'une proposition pour l'Arsenal de Brest en 1905, avec le schéma ci-dessous (*fig. 4*). I est le stator, R le rotor à pôles saillants, T un trans-

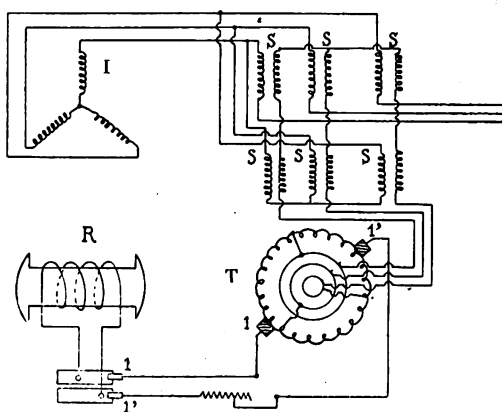


Fig. 4. — Alternateur compound synchrone.

formateur à champ tournant avec collecteur à lames et bagues collectrices entraîné synchroniquement avec R. Les S sont les

transformateurs compoundeurs, s les transformateurs shunt, ($1-1'$) les bagues et balais.

» Nous n'examinerons pas non plus le cas de l'alternateur asynchrone expérimenté également à la Thomson-Houston avec le schéma ci-dessous (fig. 5). I est le stator, R le rotor ; $1-1'$, $2-2'$,

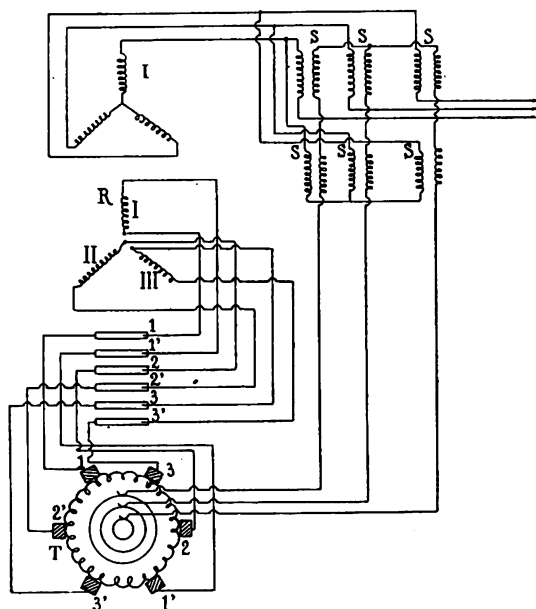


Fig. 5. — Alternateur compound asynchrone.

$3-3'$ des bagues et balais. Les S sont les transformateurs compoundeurs, s les transformateurs shunts, T le transformateur à champ tournant à collecteur Gramme.

» L'autoexcitation de ces alternateurs et le compoundage ont été vérifiés avec l'emploi de transformateurs compoundeurs à entrefer dont M. Boucherot a fait la théorie.

» Quant à l'amorçage, il s'obtenait difficilement. Il y aurait là quelques points intéressants à développer. Vers cette époque, c'est-à-dire en 1905, le régulateur Tirill arrivait d'Amérique à la Thomson-Houston, assurant la constance de la tension indépendamment de la variation de la vitesse de rotation de l'alternateur. Le compoundage à la Thomson-Houston ne présentait plus d'intérêt, nous n'avons pas poursuivi la question.

» Nous insisterons sur le fonctionnement en moteur qui est la partie originale du brevet.

» L'organe fondamental est un transformateur à champ tournant muni d'un collecteur Gramme.

» Nous supposons la machine bipolaire; soient S l'enroulement statorique d'une machine asynchrone ordinaire (fig. 6), R l'enrou-

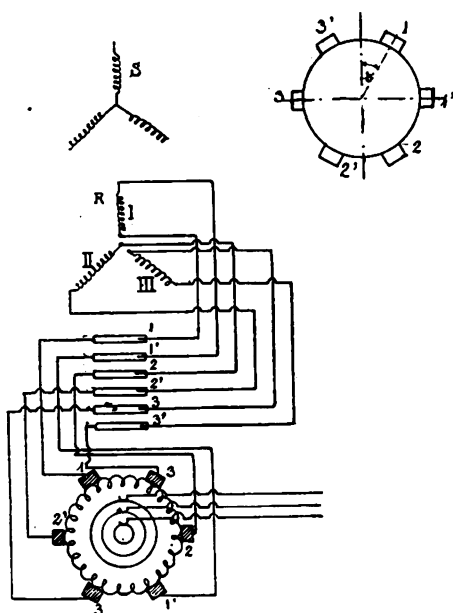


Fig. 6. — Schéma d'un moteur à vitesse variable triphasé à double jeu de balais.

lement du rotor supposé triphasé, les extrémités de la phase I sont connectées aux bagues 1 et 1', celles de la phase II aux bagues 2 et 2', celles de la phase III aux bagues 3 et 3'.

» L'organe fondamental du système est un transformateur à champ tournant entraîné synchroniquement par l'arbre du rotor R.

» C'est un bobinage d'induit à courant continu du genre Gramme disposé dans une couronne de tôles uniformément répartie circulairement. Les différentes sections sont connectées à un collecteur Gramme. Sur ce collecteur on dispose n balais distants de $\frac{2\pi}{n}$, $n = 6$ dans le cas de la figure. Des différences de potentiel polyphasées empruntées au réseau, directement ou par l'intermédiaire de transformateurs, sont disposées au moyen de bagues en des points fixes et non fixes du bobinage de manière à développer un champ tournant.

» Nous appellerons cet appareil le *transformateur à champ tournant*. On l'entraîne synchroniquement avec l'arbre du rotor.

On dispose les connexions de manière que le sens de rotation du champ tournant du transformateur soit de sens contraire à celui de la rotation du moteur asynchrone. Il est facile de voir que les balais recueilleront des différences de potentiel dont la pulsation est égale au glissement $\omega_s - \omega_r$ du moteur asynchrone, ω_s étant la vitesse du champ tournant du stator et ω_r , la vitesse de rotation du rotor.

» Quant à la phase de la différence de potentiel entre deux balais quelconques, elle dépendra du calage des balais. On peut donc, en vertu des considérations fondamentales du début, leur donner les fréquences et phases convenables pour obtenir une vitesse quelconque du moteur asynchrone, à un glissement près suivant la charge.

» Les différences de potentiel captées au collecteur sont proportionnelles aux différences de potentiel disposées aux bagues et peuvent être obtenues de grandeurs quelconques par un transformateur convenable.

» Si l'on ne veut fournir aux bagues du rotor principal que des courants magnétisants, la puissance déwattée à fournir au rotor est égale au produit par le glissement de la puissance déwattée qu'exigerait le moteur asynchrone sans excitatrice, cette puissance déwattée étant fournie au stator.

» Le facteur de puissance est donc excellent. Si, de plus, on règle la phase et la grandeur des différences de potentiel disposées aux bagues de manière à obtenir sensiblement la vitesse synchrone à pleine charge, le facteur de puissance peut être égal à 1.

» Mais, alors, il est pratiquement indépendant de la charge.

» C'est la supériorité de cet avanceur de phase sur le précédent.

» Il importerait évidemment de démarrer par intercalation de résistances et de n'introduire l'excitatrice qu'en vitesse, dans le cas où le moteur ne doit fonctionner qu'avec un glissement assez petit.

» On peut plus simplement encore intercaler pour démarrer des résistances entre l'excitatrice et les bagues du moteur asynchrone.

V. — Vitesse variable.

» Nous avons vu que, pour obtenir une vitesse quelconque, il suffit d'introduire des différences de potentiel wattées convenables entre bagues du moteur asynchrone.

» Il s'agit donc de réaliser un transformateur à rapport va-

riable et dont la réalisation coûteuse et compliquée présente certains inconvénients bien connus dus aux fuites.

» Ici encore, nous devons rappeler les travaux des précurseurs avant 1904 qui ont contribué à éclairer la question et principalement ceux de M. Blondel et de M. Roth de la Société Alsacienne pour la régulation de la vitesse des moteurs polyphasés à collecteur du genre Görges.

» Mais ces moteurs doivent disposer d'un collecteur capable de supporter toute la puissance apparente mise en jeu au collecteur, au démarrage.

» Si l'on n'utilise au contraire le collecteur que pour obtenir un glissement g du moteur, la puissance apparente mise en jeu au rotor n'est que g fois la précédente, la surface frottante n'est aussi sensiblement que g fois la précédente.

VI. — Emploi du double jeu de balais à distance angulaire variable.

» Nous nous proposons de montrer que la transformation variable de la tension du réseau en grandeur, phase et fréquence peut être obtenue en déplaçant des balais sur le collecteur du transformateur à champ tournant, et c'est la partie originale que nous revendiquons.

» Reportons-nous à la figure 6. Supposons que le premier jeu de balais 1, 2, 3, du transformateur à champ tournant soit solidaire d'un premier collier porte-balais et le deuxième jeu 1', 2', 3', solidaire d'un deuxième collier porte-balais.

» En variant l'angle α du premier collier porte-balais par rapport au deuxième nous aurons des différences de potentiel variables en grandeur efficace.

» Remarquons que si l'on voulait que les phases soient conservées, dans le déplacement des balais, il faudrait donner à chacun des colliers porte-balais des déplacements $\frac{\alpha}{2}$ égaux et de signes contraires.

» Pour régler au mieux le facteur de puissance du moteur, on pourra trouver avantage à déplacer un jeu de balais un peu plus que l'autre suivant la vitesse et la charge à obtenir.

» Je revendique le réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone à rotor à bague par le décalage relatif de deux jeux de balais sur le collecteur d'un transformateur à champ tournant, tournant synchroniquement avec le rotor.

» Toute cette description est la reproduction des termes du brevet cité plus haut.

» Un gros projet de machine d'extraction a été présenté aux mines de Béthune en 1905 par la Thomson-Houston. Le démarrage était prévu par résistance pour réduire les dimensions du collecteur, car le glissement demandé pour permettre l'inertie du volant était faible.

» On y faisait remarquer que le double jeu de balais n'introduit pas deux fois plus de balais sur le collecteur à lames puisque, pour une même puissance apparente mise en jeu, il permet, par le changement de signe de la force électromotrice wattée, de créer un glissement positif ou négatif, c'est-à-dire de varier la vitesse en valeurs relatives de $(1 - g)$ à $(1 + g)$ soit une variation de vitesse qui est le produit de $2g$ par la vitesse de synchronisme.

» On peut évidemment disposer l'enroulement du transformateur tournant à l'intérieur des tôles du stator en utilisant ainsi le flux tournant du stator. Il faudrait alors utiliser un collecteur fixe et des balais tournant synchroniquement avec le rotor sur ce collecteur. Mais, les balais tournants ne sont pas recommandables; de plus il faudrait des bagues auxiliaires connectées à ces balais pour pouvoir capter les courants recueillis aux balais du collecteur à lames. Les courants recueillis par ces bagues seraient envoyés ensuite aux bagues du rotor.

» Il est possible comme l'on sait et préférable de faire tourner toutes les parties fixes précédemment et de laisser fixes toutes les parties tournantes; alors les bagues sont remplacées par des connections fixes et les balais tournants sont supprimés.

» C'est précisément cette dernière disposition qu'ont adoptée M. Schrage et le Dr Rudenberg; ils ont abouti à la disposition de la figure 7. P est l'enroulement tournant (précédemment statorique) alimenté par le réseau (au moyen de bagues), S est l'enroulement principal (précédemment rotorique), R est l'enroulement Gramme de transformateur à champ tournant, disposés dans le fer du rotor 1 — 1', 2 — 2', 3 — 3' sont les balais frottant sur le collecteur à lames relié aux sections de l'enroulement R.

» Cette disposition présente certainement de l'intérêt; principalement pour les petits moteurs, surtout quand on peut arriver à confondre l'enroulement principal recevant le courant du réseau par les bagues et l'enroulement de transformateur à champ tournant, c'est-à-dire les enroulements P et R.

» Elle a plusieurs inconvénients :

» 1^o L'adaptation du collecteur à lames à l'enroulement portant les bagues impose des conditions de dimensions souvent gênantes.

» 2° Il est difficile, dans les moteurs d'une certaine puissance, de respecter la valeur maximum ϵ de tension par section reliée au collecteur et compatible avec une bonne commutation.

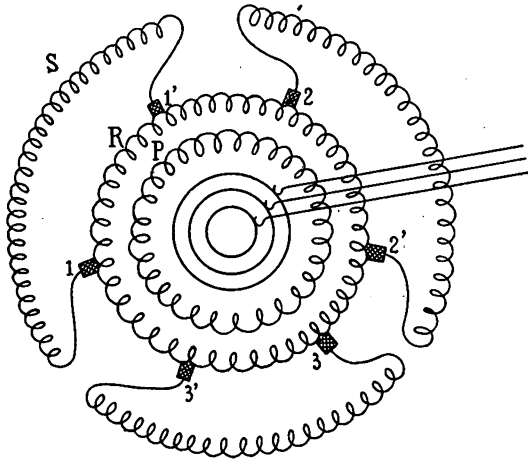


Fig. 7. — Moteur de l'Almanna Svenska Elektriska Aktiebolaget.

» Mais, de toute façon, l'originalité du système est dans le double jeu de balais permettant d'agir sur le facteur de puissance et la vitesse par leurs déplacements.

» La longue controverse, en 1913, entre MM. Latour, le Dr Rudenberg de la maison Siemens, M. Schrage qui faisait construire ces moteurs à l'Almanna Svenska Elektriska Aktiebolaget, m'a amené, après la guerre, à faire cette Communication que j'aurais pu faire il y a 15 ans. Malheureusement les ingénieurs s'occupant de produire n'ont pas toujours les loisirs suffisants pour publier.

» Mais, Messieurs, la grande invention en courants polyphasés est le moteur sans balais qui a assuré et assurera encore longtemps le succès des courants polyphasés.

Note.

» Nous devons faire remarquer que les fréquences des génératrices asynchrones débitant des courants wattés et déwattés peuvent être prédéterminées théoriquement. C'est principalement une question de saturation du fer, et la caractéristique de circuit magnétique entre en jeu d'une manière fondamentale.

» Mais aucun des auteurs ne développe la théorie de la mise en

parallèle de machines asynchrones autoexcitatrices motrices ou génératrices avec un réseau, cela tout au moins à ma connaissance.

» Lorsque plusieurs alternateurs synchrones ou asynchrones auto-exciteurs seront en parallèle sur un réseau, n'y aura-t-il qu'une fréquence ?

» Quelles sont les conditions auxquelles il faudra satisfaire pour qu'il n'y en ait qu'une ?

» En un mot peut-il y avoir un chef d'orchestre, suivant la pittoresque expression de Maurice Leblanc, et sera-t-il écouté ? Voilà une question à étudier. Je crois que la saturation du fer peut jouer là aussi un rôle fondamental. »

M. le Président remercie M. Gratzmuller de son intéressante Communication.

LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE TÉLÉGRAPHIE RAPIDE.

M. E. MONTORIOL. — « Dès le milieu du siècle dernier, on fut frappé de la mauvaise utilisation des lignes desservies à l'aide de la transmission manuelle. En effet, alors que la plupart des conducteurs pourraient transporter nettement un nombre d'émissions supérieur à 100 par seconde, un Morse, dans le même temps, n'en donne guère que deux, en moyenne; aussi chercha-t-on à diminuer un écart aussi considérable, et c'est de cette préoccupation que naquirent un grand nombre de systèmes qui, à des degrés très divers, méritèrent le nom de *rapides* donné à cette catégorie spéciale.

» En ce moment où la France peut légitimement entrevoir une renaissance industrielle et commerciale qui lui permette de réparer ses ruines et où, par suite, le service télégraphique aura à faire face à des charges nouvelles, il a paru opportun de rechercher si l'outillage actuel est bien à la hauteur des besoins à prévoir. Jusqu'ici le Baudot, notre appareil national, placé au premier rang par le monde entier, a répondu à tous les besoins; mais la guerre, qui a donné un essor si puissant à tant d'autres branches de la science, n'a-t-elle pas mis en lumière des perfectionnements, fait surgir des systèmes nouveaux, susceptibles de reléguer le Baudot au second plan ? Dans l'affirmative, aucune considération ne saurait primer l'intérêt supérieur d'un service qui doit être, avant tout, l'auxiliaire de l'activité nationale; dans la négative, l'introduction inconsidérée d'un matériel nouveau, ne répondant pas à un besoin bien défini ou ne constituant pas, sur l'ancien, un progrès tangible, risquerait, par la complication inutile qu'elle entraînerait, d'aller à l'encontre du but qu'on se propose. La solution de cet important problème ne peut être obtenue que par l'examen de tous les systèmes actuellement en usage ou reposant sur des principes intéressants, et par une discussion purement technique, c'est-à-dire dégagée de toute considération accessoire, commerciale, nationale ou autre, susceptible d'en fausser le résultat.

» Tel est le but de cette étude.

» Les systèmes rapides peuvent se classer en deux groupes distincts : les *automatiques* et les *multiples*; le principe de chacun d'eux va être exposé de façon aussi succincte que possible.

Systèmes automatiques.

» Cette première catégorie comprend les appareils dans lesquels la main humaine est remplacée par des organes mécaniques, capables d'expédier automatiquement des transmissions préparées à l'avance par un nombre plus ou moins grand d'opérateurs.

» **Automatique Wheatstone.** — Le premier système réellement rapide est celui de Wheatstone, dont les premiers essais remontent à 1850, et qui revêtit sa forme définitive actuelle vers 1873. Les signaux transmis sont ceux du code Morse; ils sont représentés par des perforations pratiquées dans une bande de papier spécial, qu'on introduit ensuite dans un transmetteur automatique; cette bande est comparable à celles qu'on emploie dans les métiers à tisser, d'où le nom de *Jacquart électrique* qu'on donna à l'appareil lors de son apparition.

» Le perforateur comprend trois touches, correspondant, de gauche à droite, aux points, aux intervalles et aux traits; lorsqu'elles sont abaissées, ces touches actionnent des poinçons qui percent le papier; la bande ainsi préparée (*fig. 1*) présente trois



Fig. 1. — Bande de transmission Wheatstone.

séries de trous, l'une à la partie médiane, pour la progression du papier, les deux autres vers les bords et de diamètre plus grand; les points Morse sont représentés par deux de ces trous placés sur une même transversale, les traits par deux trous placés obliquement l'un par rapport à l'autre.

» Le transmetteur automatique (*fig. 2*) comprend un balancier B, animé d'un mouvement oscillatoire très rapide et qui commande deux aiguilles verticales, *a* et *a'*; celles-ci sont ainsi sollicitées à pénétrer dans les trous de la bande perforée, P. Lorsque l'aiguille, *a*, d'arrière rencontre un trou, elle s'élève en y pénétrant et fait basculer l'inverseur de pile, I, par l'intermédiaire de la tige T: un courant positif est envoyé sur la ligne; un trou, présenté à l'aiguille d'avant, *a'*, lui permet un mouvement analogue, qui ramène

l'inverseur à sa position primitive, et la ligne reçoit un courant négatif. On émet ainsi un point ou un trait suivant le temps qui sépare le premier mouvement du second, c'est-à-dire suivant l'intervalle que présente la bande perforée entre deux trous consécutifs de l'une et de l'autre série.

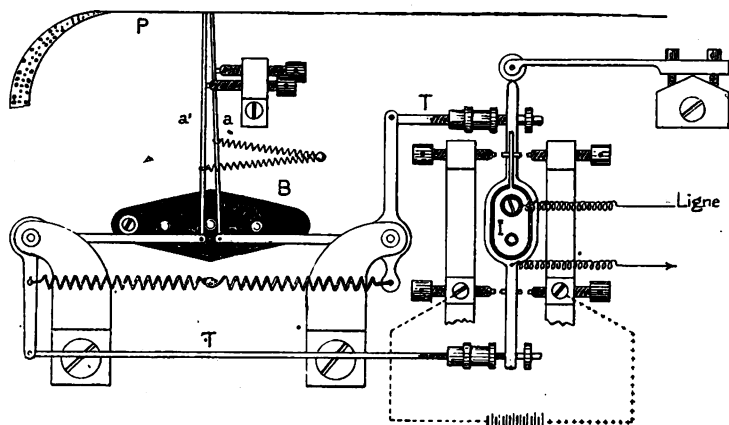


Fig. 2. — Transmetteur automatique Wheatstone.

» Les signaux, points et traits, sont reçus dans un récepteur analogue au récepteur Morse ordinaire, mais auquel on a donné toutes les qualités de rapidité désirables.

» Dans les installations plus récentes, il est fait usage du perforateur Gell, qui se présente sous l'aspect extérieur d'une machine à écrire; chaque levier est entaillé de manière à choisir les poinçons propres à la perforation du signal qui correspond à la lettre marquée sur le bouton; cet instrument offre le double avantage d'un apprentissage à peu près nul et d'un rendement de beaucoup supérieur, avec une fatigue moindre.

» **Automatique Creed.** — Le système Creed est un perfectionnement du Wheatstone; la bande de transmission est préparée à l'aide du perforateur Kleinschmidt qui, comme celui de Gell, affecte la disposition d'une machine à écrire; le transmetteur automatique est celui de Wheatstone. A l'arrivée, le récepteur perce une bande identique à celle de départ; cette bande peut servir, soit à une réexpédition du message, s'il est reçu en transit, soit à mettre en action un traducteur automatique pour obtenir une impression typographique sur une bande de papier.

» Le récepteur-perforateur Creed est agencé de la façon suivante :

la bande de papier huilé 18 (à la partie inférieure de la figure 3) a été percée préalablement, à sa partie médiane, de petits trous d'entraînement, dans lesquels pénètrent les goupilles implantées sur le pourtour d'une roue, 19, mue elle-même par un moteur

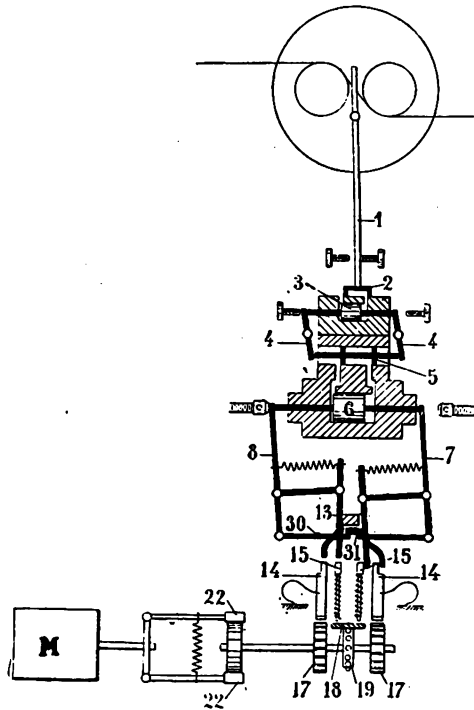


Fig. 3. — Récepteur-perforateur Greed.

électrique, M. Afin de permettre la *correction* dont il sera question plus loin, la roue 19 est entraînée par l'intermédiaire d'un embrayage à friction, 22. La bande se déroule d'un mouvement continu devant les tiges correctrices 14 et les poinçons 15.

» Les courants sont reçus dans un relais polarisé dont l'armature, dépourvue de contacts électriques, porte une languette, 1, au bout de laquelle est fixée une soupape équilibrée, 2, très légère. Si un courant positif, par exemple, déplace l'appendice vers la droite, une admission d'air comprimé a lieu et le piston 3 est poussé vers la droite ; ce mouvement est communiqué, par les leviers 4 à la soupape 5, qui se déplace dans le sens contraire, et le piston 6 du moteur principal est poussé vers la droite ; la manivelle 7 et la tige 30 communiquent le mouvement à la manivelle 8 qui, à son tour, met en jeu le marteau de gauche, 13, dont la fourche

terminale vient buter contre la tige correctrice 14 et le poinçon 15. L'extrémité de la tige 14 vient s'engager entre deux dents de la roue correctrice 17, et immobilise momentanément la bande, pendant que le poinçon pénètre dans le papier juste en face d'un trou médian; à ce moment, le marteau 13, rencontrant le taquet 31, glisse vers la droite, et, abandonnant la tige et le poinçon, leur permet de revenir au repos; ce mouvement, aller et retour, a duré environ $\frac{1}{300}$ de seconde.

» Un courant négatif, arrivant ensuite, détermine la mise en action de la tige et du poinçon de droite; ceux-ci sont décalés vers l'avant, afin que, si l'inversion du courant a lieu aussitôt après (cas d'un point), la perforation de droite se trouve en face de celle de gauche, bien que, dans l'intervalle, la bande ait avancé d'une petite quantité. Dans le cas d'un trait, le temps qui s'écoule entre le positif et le négatif permet à la bande d'avancer d'une division complète et le trou de droite est percé vis-à-vis le trou médian suivant. Un synchronisme relatif, entre le transmetteur et le récepteur, est nécessaire pour obtenir cette différenciation. L'appareil peut suivre correctement un transmetteur travaillant à la vitesse de 120 à 130 mots à la minute; il fonctionne sous l'action d'un courant de ligne de 15 à 20 milliampères et sous une pression de 2 kg par centimètre carré.

» L'imprimeur Creed a l'aspect général d'une machine à écrire. Les lettres sont gravées au bout de leviers articulés; ceux-ci sont commandés chacun par une lame horizontale, L (fig. 4), terminée

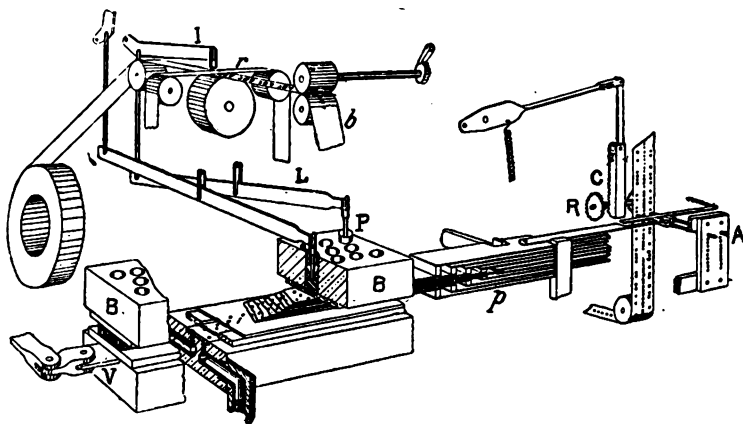


Fig. 1. — Imprimeur Creed.

par un piston, P, engagé dans un trou cylindrique pratiqué dans le bloc commun B. Si l'on envoie de l'air comprimé dans le cylindre,

le piston est chassé et le levier imprimeur est actionné comme dans les machines à écrire manuelles.

» Sous l'action d'un moteur électrique, agissant sur un arbre à cames, et d'un dispositif à crémaillère dont il sera question plus loin, la bande perforée est amenée lettre par lettre dans une glissière, en face d'une série de dix paires d'aiguilles sélectrices, A, susceptibles de commander dix plaques-soupapes à coulisses, p. Les trous dont sont percées ces plaques sont disposés de telle sorte que, pour chaque combinaison d'aiguilles sélectrices pénétrant dans les perforations de la bande, les différentes plaques établissent une communication entre un collecteur d'air et l'un des pistons, celui qui correspond à la lettre représentée par la perforation qui donne lieu au mouvement; à ce moment, une came ouvre la valve V, l'air comprimé est admis dans le cylindre et chasse le piston, la lettre gravée au bout du levier correspondant vient frapper sur le ruban encreur r et laisse son empreinte sur la bande b; aussitôt après, la valve est fermée et une soupape permet l'échappement de l'air; les plaques p reprennent leur position initiale, dans laquelle l'accès aux pistons est toujours obstrué au moins par l'une d'elles.

» Les lettres perforées ont sur la bande des longueurs très différentes; l'appareil les distingue par l'artifice suivant : sur l'axe de la roue d'entraînement de la bande est montée une roue dentée, R, commandée par une crémaillère, C : la course laissée à celle-ci détermine donc la longueur dont la bande avance après chaque impression; or, chaque paire d'aiguilles commande un levier commun, dit *levier d'espacement*, placé sur la trajectoire verticale de la crémaillère; si l'une ou l'autre des aiguilles d'une même paire est actionnée, elle entraîne le levier, qui laisse la voie libre à la crémaillère; si, au contraire, comme c'est le cas lorsque la bande présente un espace blanc, les deux aiguilles restent au repos, le levier d'espacement qui leur correspond limite la course de la crémaillère, de telle sorte que, lors du retour de bas en haut, la bande avance exactement de la longueur qui correspond à la place occupée par la lettre qui vient d'être traduite.

» Cet appareil peut imprimer 125 lettres à la minute.

» **Automatique Murray.** — Le système automatique Murray emploie le code Baudot, dont il sera question plus loin, et qui est formé par les 31 combinaisons qu'on obtient avec 5 éléments de signaux (*voir* p. 396). La bande à perforer est munie à l'avance, comme celle de Creed, de trous d'entraînement; chaque lettre occupe l'espace de 5 de ces trous, comme le montre la figure 5. Le

perforateur est du type machine à écrire; la transmission automatique est effectuée par un transmetteur Wheatstone, mais à une seule aiguille; celle-ci se présente à la bande à intervalles réguliers, au-dessus de chaque trou d'entraînement; si la bande est perforée à cet endroit, l'aiguille se lève, et l'inverseur envoie sur la ligne un courant positif; si, au contraire, l'aiguille est arrêtée, c'est un courant négatif qui est émis.



Fig. 5. — Bande de transmission Murray.

» A l'arrivée, le récepteur perfore une bande qui, de même que pour le système Creed, peut servir soit à la réexpédition, soit à la traduction; contrairement à ce qu'on vient de voir pour le Creed, toutes les fonctions du perforateur et de l'imprimeur sont électriques.

» **Automatique Siemens.** — L'appareil automatique de Siemens est, à proprement parler, un Baudot à un seul secteur, dont les balais tournent à grande vitesse et en synchronisme avec ceux du poste correspondant. Il sera reparlé de ce système lorsqu'aura été examiné le Baudot lui-même; disons seulement, pour l'instant, que le perforateur est, là encore, du type machine à écrire et qu'à l'arrivée, les signaux peuvent être soit perforés comme dans les précédents systèmes, soit traduits directement en lettres typographiques. Le rendement de l'appareil est limité par le fonctionnement du mécanisme imprimeur; cette limite est atteinte vers 500 ou 600 révolutions des balais par minute, ce qui correspond à 80 ou 100 mots.

» **Automatique Buckingham-Barclay.** — On peut mentionner encore le système automatique Buckingham-Barclay, employé par la Western-Union Telegraph Cy; les bandes sont préparées par un clavier-machine à écrire et suivant un code qui lui est spécial, puis on les passe dans un transmetteur automatique Wheatstone. A l'arrivée, les signaux sont imprimés directement sur une feuille, qu'on change après chaque message. Le rendement maximum de ce système se tient aux environs de 100 mots à la minute.

» **Automatique Pollak-Virag.** — Le système automatique Pollak-

Virag diffère essentiellement des précédents quant à son principe, qui est le suivant : les courants parvenant au poste récepteur mettent en mouvement un petit miroir sur lequel vient frapper un rayon lumineux; ce rayon, convenablement réfléchi, trace, en écriture cursive, les lettres et les mots sur une bande de papier photographique, qu'il suffit ensuite de développer et de fixer à la façon ordinaire. Voici comment ce résultat est obtenu : au dos du miroir en verre est collée une petite plaquette de fer doux appuyée sur trois pointes fortement aimantées; les trois pointes W, U, S (fig. 6) forment les trois sommets d'un triangle rectangle;

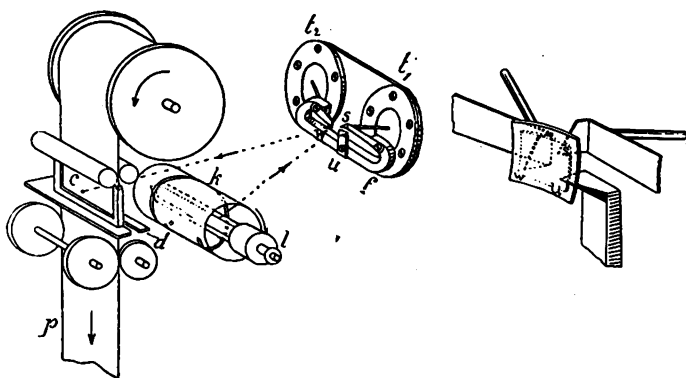


Fig. 6. — Récepteur Pollak-Virag

l'une, U, est fixe; les deux autres, montées sur des ressorts, sont élastiques et reliées, par de petites bielles, au centre des membranes de deux récepteurs téléphoniques, t_1 et t_2 ; celles-ci, lorsqu'elles se déplacent sous l'action de courants venant de la ligne, déterminent des oscillations du miroir, autour de l'axe vertical US, ou autour de l'axe horizontal WU : on a donc les deux composantes du tracé à obtenir.

» Le rayon lumineux est émis par une lampe à incandescence à filament rectiligne, l , enfermée dans un cylindre en tôle, k , placé lui-même dans un second cylindre non représenté sur la figure; le cylindre k est entaillé d'une rainure en hélice et tourne autour d'un axe horizontal à raison de 3 à 4 tours par seconde; le second cylindre est fixe et fendu suivant une génératrice; le rayon lumineux émis par la lampe ne peut donc passer que par l'intersection de la rainure hélicoïdale et de la fente rectiligne; ce point lumineux se déplace ainsi suivant une ligne droite; aussi longtemps que le miroir reste fixe, le point réfléchi, qui vient frapper la bande de papier photographique p , l'impressionne

également suivant une ligne droite; mais, si le récepteur t_1 , par exemple, est parcouru par des courants, le miroir se trouve déplacé autour de son axe horizontal, et il en résulte des élongations verticales du point C, au-dessus ou au-dessous de la ligne normale, suivant que la membrane a été attirée ou repoussée, c'est-à-dire suivant le sens des courants reçus; si les impulsions sont envoyées dans l'autre téléphone, t_2 , le miroir bascule autour de son axe vertical, les déplacements horizontaux du point C accélèrent ou retardent son mouvement normal. On a donc là, ainsi qu'il a été dit plus haut, les deux composantes des déplace-

*_____ dans le s
ystème de télégraphie
à transmission rapide
de Pollak et Virag
le récepteur diffère e
ssentiellement des rece
pteurs employés jusqu
à ce jour les imp
ulsions de courant q
ue l'on transmet aut
omatiquement au moy
en d'une bande de p
apier perforée sont
dirigées au poste rece
pteur dans un télépho
ne dont la membrane
est munie d'un petit
miroir.*

Fig. 7. — Bande de réception Pollak-Virag.

ments à donner au point C pour que la résultante soit un tracé d'écriture cursive, semblable à celui que montre la figure 7. La bande passe ensuite dans des bains de développement et de fixage, dans lesquels elle reste respectivement environ 6 et 7 secondes; le papier est presque complètement sec lorsqu'il sort de l'appareil.

» La correspondance exige l'emploi de deux fils de ligne; le récepteur t_1 est inséré dans le circuit comme un téléphone ordinaire; les courants qui parcourent l'autre, t_2 , suivent les deux fils en parallèle, grâce à un dispositif semblable à ceux qu'on emploie dans les installations de télégraphie et de téléphonie simultanées.

» La transmission est automatique et effectuée à l'aide d'une bande perforée par un clavier de machine à écrire; cette bande est virtuellement divisée longitudinalement en deux parties égales, correspondant respectivement à l'un et à l'autre téléphone; les perforations sont elles-mêmes réparties, dans chaque moitié, suivant trois divisions virtuelles, qui permettent l'envoi, dans chaque téléphone, d'une intensité négative et de deux intensités positives différentes. La bande passe ensuite sur un cylindre formé de six bagues reliées aux divers voltages; six balais métalliques, conjugués électriquement en deux groupes de trois, frottent sur la bande à son passage sur le cylindre et, lorsqu'ils rencontrent un trou, prennent contact avec la bague placée au-dessous, et un courant, de sens et d'intensité convenables, est envoyé sur la ligne à laquelle ce balai est relié.

» L'appareil Pollak-Virag a été mis en essai en Allemagne en 1903, et en Angleterre en 1905; le rapport allemand constate qu'il écoulait environ 32 000 mots à l'heure, ce qui fait ressortir le rendement de chaque conducteur à 16 000 mots par heure ou à 266 par minute, soit près de 50 pour 100 de plus que le rendement théorique d'un sextuple Baudot tournant à 180 tours; les inventeurs prétendent même atteindre 40 000 mots. Toutefois, il s'accommode mal des sections souterraines que comprennent inévitablement les fils aériens, et celles-ci avaient été supprimées dans les expériences dont les résultats sont mentionnés plus haut. Il fut abandonné, aussi bien dans l'un que dans l'autre pays, en particulier à cause des troubles d'induction qu'il occasionnait dans les lignes voisines et aussi, dit le rapport anglais, « à cause du besoin de deux conducteurs de gros calibre et du prix élevé du papier photographique ⁽¹⁾ ». On doit ajouter enfin que les bandes obtenues à l'arrivée ne sont peut-être pas d'une lisibilité assez parfaite pour être remises telles quelles au public, que les mots et souvent même les lettres sont coupés aux bouts de lignes, et que, de ce fait, une transcription à la machine à écrire serait sans doute nécessaire, ce qui entraînerait une importante main-d'œuvre supplémentaire.

(1) *The Post Office Electrical Engineers Journal*, avril 1917, p. 5.

Systèmes multiples.

» Les systèmes multiples reposent sur le principe de la division du temps : deux organes mobiles tournent en synchronisme aux deux extrémités de la ligne, et la répartissant, à des moments déterminés, entre plusieurs opérateurs; les transmissions, ainsi effectuées, semblent simultanées, mais sont en réalité *successives*, chaque agent, après avoir expédié un signal, disposant, pour préparer le suivant, du temps pendant lequel la ligne est attribuée aux autres. Il va sans dire que la transmission automatique, par bandes perforées, peut être substituée à la transmission manuelle, mais elle a lieu dans les mêmes conditions que celle-ci, c'est-à-dire *par secteur*; c'est là une différence essentielle, par rapport aux systèmes qui précèdent, et dans lesquels un transmetteur automatique *unique* dessert la ligne.

» Le principe de la transmission multiple, indiqué par Rouvier en 1858, fut appliqué pour la première fois en 1872 par Meyer, qui réalisa une installation permettant d'effectuer simultanément six transmissions en signaux Morse; le système resta en exploitation en France jusque vers 1885, époque à laquelle il dut céder le pas au Baudot; il fut également adopté à l'étranger, notamment en Allemagne et en Autriche.

» **Multiple Baudot.** — Les signaux Baudot sont formés à l'aide d'un clavier de 5 touches; en abaissant soit une seule touche, soit deux ou plusieurs simultanément, on peut exécuter 32 combinaisons, dont 31 utilisables (la 32^e étant celle où les 5 touches sont au repos). Le tableau ci-après (*fig. 8*) donne le code de manipulation ainsi que l'affectation des signaux. Il est à remarquer qu'un système d'inversion mécanique, analogue à celui de l'appareil Hughes, porte à 58 le nombre des lettres ou signes susceptibles d'être imprimés, les deux dernières combinaisons servant à faire l'espacement des groupes de signaux, lettres ou chiffres, et à mettre en action ledit système d'inversion.

» L'organe principal de l'installation est le distributeur, qui consiste essentiellement en un plateau d'ébonite, portant des couronnes métalliques concentriques, divisées en contacts isolés électriquement les uns des autres; chacune de ces couronnes est parcourue par un balai; l'axe qui entraîne les balais est animé d'un mouvement rigoureusement isochrone; au poste correspondant est un distributeur semblable, dont les balais sont mis en synchronisme avec ceux du premier, c'est-à-dire tournent à la

même vitesse et se trouvent, au même moment, sur des contacts symétriques.

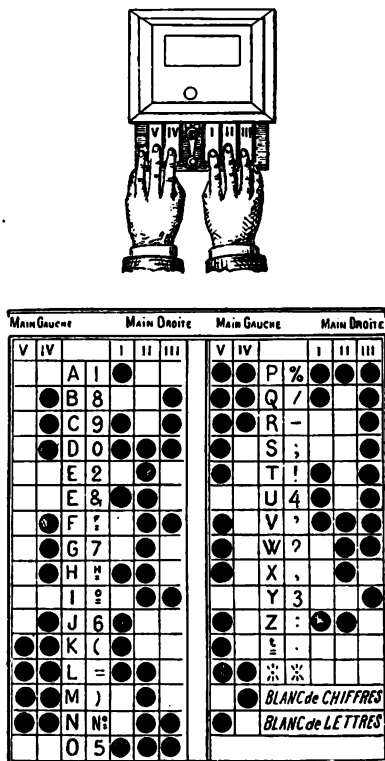


Fig. 8. — Alphabet Baudot.

» Au poste A, par exemple (*fig. 9*), les touches d'un manipulateur sont reliées à cinq contacts consécutifs d'une couronne du distributeur; au poste B, les contacts de mêmes numéros sont connectés avec cinq électro-aimants polarisés; si l'on exécute, sur le manipulateur de A, l'une des 31 combinaisons, par exemple celle qui comporte l'abaissement des touches 1, 3, 5 (lettre T), on relie de ce fait les contacts 1, 3 et 5 du distributeur à la pile de travail, tandis que les deuxième et quatrième restent en relation avec la pile de repos; lorsque les balais des deux postes passent sur le contact n° 1, un courant de travail est envoyé sur la ligne et reçu dans le premier électro-aimant de B, dont l'armature se trouve déplacée; un courant de repos est émis ensuite par le deuxième contact et maintient la deuxième armature sur son butoir de repos; un nouveau courant de travail, au moment du passage

des balais sur le troisième contact, déplace la troisième armature, et ainsi de suite; lorsque les balais ont franchi le secteur, on trouve les première, troisième et cinquième armatures sur travail, tandis que les deuxième et quatrième sont restées sur repos : le groupe des 5 armatures de B reproduit donc la combinaison exécutée au départ, sur le manipulateur de A; il ne reste plus qu'à la traduire.

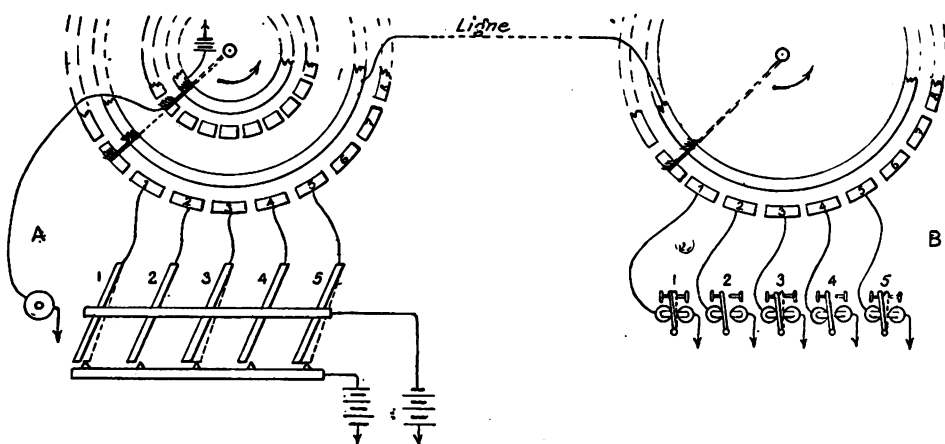


Fig. 9. — Principe du multiple Baudot.

L'opérateur est averti du moment opportun d'abaisser les touches par un métronome, ou *frappeur de cadence*, actionné par le distributeur.

» Les installations sont dites *doubles*, *triples*, *quadruples*, *sex-tuples*, suivant que les balais, dans une révolution, parcourent deux, trois, quatre ou six secteurs semblables, le nombre des révolutions, pour la transmission manuelle, restant fixé à 180 par minute, quel que soit le type d'installation. Le diagramme ci-après (*fig. 10*) montre la disposition de deux distributeurs quadruples, permettant soit quatre transmissions dans le même sens, soit une dans un sens et trois dans l'autre, soit enfin deux dans chaque sens; on y voit qu'en plus des 20 contacts nécessaires pour les quatre secteurs, deux sont réservés pour la *propagation*, c'est-à-dire pour le temps qui s'écoule, dans chaque poste, entre la fin de sa transmission et le commencement de sa réception; enfin, deux autres contacts sont destinés à l'envoi et à la réception de deux courants dits *correcteurs*; ceux-ci, reçus dans un électro-aimant spécial au poste A, décalent ses balais lorsqu'ils tendent à se trouver en désaccord avec ceux de B; ce décalage représente un angle de 1° à $1^{\circ},5$.

» Les contacts de propagation et de correction ont été supprimés, en 1903, par Pierre Picard, qui installa, sur le câble sous-marin Marseille-Alger, un triple à 15 contacts; la correction du

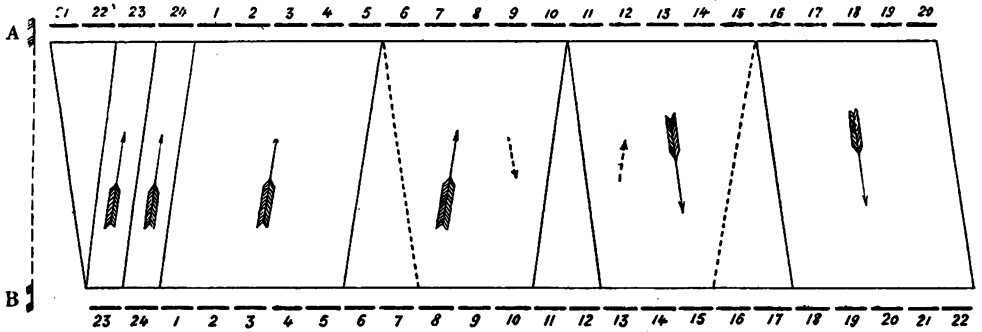


Fig. 10. — Diagramme d'un quadruple Baudot.

synchronisme est obtenue « sans courants spéciaux » : le relais de correction est susceptible de fonctionner lors des inversions du sens du courant reçu, c'est-à-dire lorsqu'un positif succède à un négatif, et inversement, si, à ce moment, le balai du poste corrigé ne se trouve pas exactement à la fin d'une division et au commencement de la suivante. Ce mode de synchronisation a été repris dans les systèmes Murray et Western dont il sera question plus loin; la suppression des contacts de propagation exclut la possibilité d'alterner le sens de la transmission à chaque tour des balais, aussi ces dernières installations doivent-elles nécessairement fonctionner en duplex alors que, dans les installations Baudot ordinaires, le duplex est facultatif.

» Les signaux enregistrés par le groupe des cinq armatures de relais sont traduits automatiquement par un organe appelé *combineur*; le premier type de l'espèce fonctionna en 1877, avec la première installation quintuple installée par Baudot; il est mentionné ici parce qu'il a été repris, en 1912, par Siemens, qui l'associa à son système automatique, dont il a été question plus haut (voir p. 391). Il consiste essentiellement en un cylindre en ébonite portant, sur les trois quarts de son pourtour, cinq rangées de plots métalliques parcourues chacune par un balai; la figure 11 donne le développement de ce cylindre : 31 génératrices portent chacune une combinaison du code Baudot, les touches abaissées étant représentées par les cases noires et celles au repos par les cases blanches. Dans chaque couronne les plots correspondant aux cases noires sont réunis entre eux et au butoir de travail de l'un des

cinq relais récepteurs; de même, tous ceux que représentent les cases blanches sont reliés respectivement aux butoirs de repos de ces mêmes relais.

» Sur l'axe d'entraînement des balais est montée une roue des types, portant les caractères gravés dans l'ordre où se présentent les combinaisons sur le combinateur et orientée, en outre, de manière que, lorsque les balais passent sur une combinaison donnée, la lettre correspondante se présente à la bande.

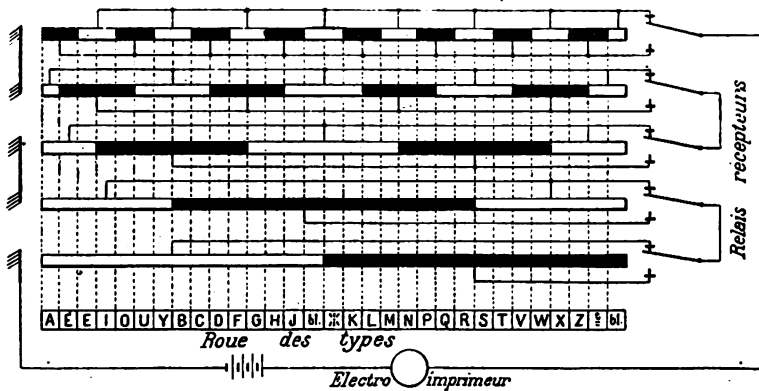


Fig. 11. — Combinateur électrique de Baudot.

» Si l'on fait tourner les balais alors que les relais sont tous au repos, le circuit local ne sera fermé en aucun point du cylindre, puisque celui-ci ne présente nulle part cinq cases blanches sur une même génératrice; mais si l'on a reçu la combinaison "T", prise plus haut comme exemple, le circuit local se trouvera fermé; lorsque les balais passeront sur la vingt-cinquième génératrice le mouvement de l'armature de l'électro-aimant imprimeur sera utilisé pour projeter la bande contre la roue des types; et comme c'est précisément la lettre T qui est gravée en cet endroit, on aura la traduction du signal reçu. D'une façon plus générale, une combinaison quelconque étant enregistrée par les relais, les balais du combinateur explorent successivement toutes les combinaisons, et la fermeture est toujours obtenue au moment où les balais passent sur cette même combinaison et à ce moment là seulement, pour toute la durée d'une révolution.

» Le combinateur construit par Siemens ne diffère de celui-ci que par le groupement des combinaisons; en outre, la pile du circuit local est remplacée par un condensateur de 10 microfarads, chargé, à la fin de chaque révolution des balais, par une source positive

combinaison qu'on doit obtenir l'enfoncement, puisque c'est aussi le moment où la lettre T passe devant la bande; or, le peigne est alors soutenu par les reliefs 1, 3 et 5, qui portent les numéros des touches abaissées au départ. Pour obtenir la chute désirée, il est donc nécessaire de substituer momentanément à ces trois reliefs, trois creux. On obtient un résultat analogue par l'artifice suivant : chacune des cinq colonnes, ou *voies* du tableau ci-dessus, est doublée d'une colonne inverse (fig. 13), c'est-à-dire présentant des creux là où la première a des reliefs, et réciproquement; la première prend le nom de *voie de repos*, R, tandis que sa complémentaire devient la *voie de travail*, T; enfin, les cinq électro-aimants récepteurs sont agencés de telle sorte que ceux dont l'armature est actionnée commandent une sorte d'aiguillage, qui oblige les dents correspondantes du peigne, appelées *leviers chercheurs*, à passer de la voie de repos dans celle de travail, sans cesser pour cela d'être solidaires des autres, restées dans la voie de repos. On voit ainsi que, dans le cas supposé plus haut, les premier, troisième et cinquième chercheurs, ainsi aiguillés, ne s'opposeront plus à la chute, et ce mouvement mécanique pourra être utilisé pour projeter la bande contre la lettre T, que présente à ce moment la roue des types.

» Le combinateur actuel ne comprend plus que deux voies : en effet, l'ordre dans lequel se présentent les combinaisons peut être varié à l'infini, pourvu que les caractères correspondants soient gravés dans le même ordre sur la roue des types. Or, si l'on examine le groupement de la figure 14 qui pourrait, comme le précédent, représenter les cinq voies de repos du combinateur, on constate que ces cinq voies sont identiques, mais échelonnées à une division d'intervalle; les chercheurs rencontreront donc la même succession de creux et de reliefs, soit qu'on les place de front comme dans le précédent combinateur, soit qu'on les dispose l'un derrière l'autre, sur une seule voie. Dans ces conditions, la première colonne de ce tableau peut devenir l'unique voie de repos, à la condition de lui ajouter, au commencement, quatre divisions supplémentaires; une voie de travail inverse complète ce combinateur ainsi réduit à deux disques.

» Il convient de mentionner encore le traducteur non rotatif Eglin, dont la construction, interrompue par la guerre, va sans doute être reprise incessamment, les premiers essais ayant donné d'excellents résultats : les lettres sont supportées par des leviers articulés, semblables à ceux d'une machine à écrire, et maintenus au repos par six disques formant une sorte de cylindre vertical; cinq de ces disques sont entaillés d'encoches disposées comme dans les

combinateurs rotatifs; le sixième ou disque d'arrêt porte 31 encoches et autant de reliefs; ces derniers dans la position de repos s'opposent à la chute des leviers, même en l'absence de ceux du combinateur.

» Chaque fois que l'armature de l'un des électro-aimants récepteurs

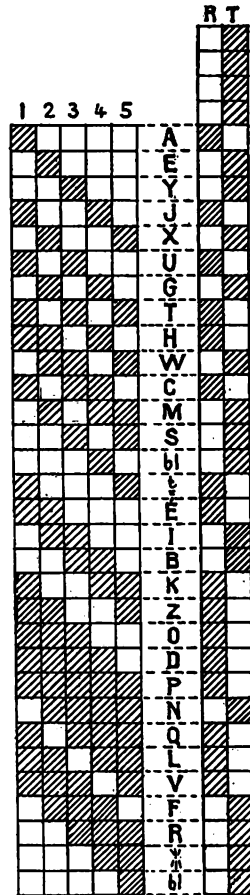


Fig. 14. — Combinateur Baudot à 2 voies.

est actionnée, elle déplace le disque combinateur de même numéro et, suivant le nombre et la place occupée par les disques ainsi déplacés, chacun d'eux présente simultanément une encoche à l'un ou à l'autre des leviers, en réalité à celui qui porte la lettre correspondant à la combinaison reçue; aussitôt après, un courant est envoyé par le distributeur qui actionne un sixième électro-aimant, lequel déplace, à son tour, le disque d'arrêt : tous les leviers sont ainsi

libérés, mais, seul, celui qui trouve devant lui six encoches tombe sur le ruban encreur et imprime la lettre dont il est porteur; enfin, le disque d'arrêt, en se déplaçant, a fermé le circuit d'un septième électro-aimant, dit *électro de rappel*, qui ramène au repos tout le système avant que le distributeur envoie une nouvelle combinaison à traduire.

» **Transmission automatique Carpentier.** — La transmission automatique a été appliquée au Baudot, en 1903, avec le système

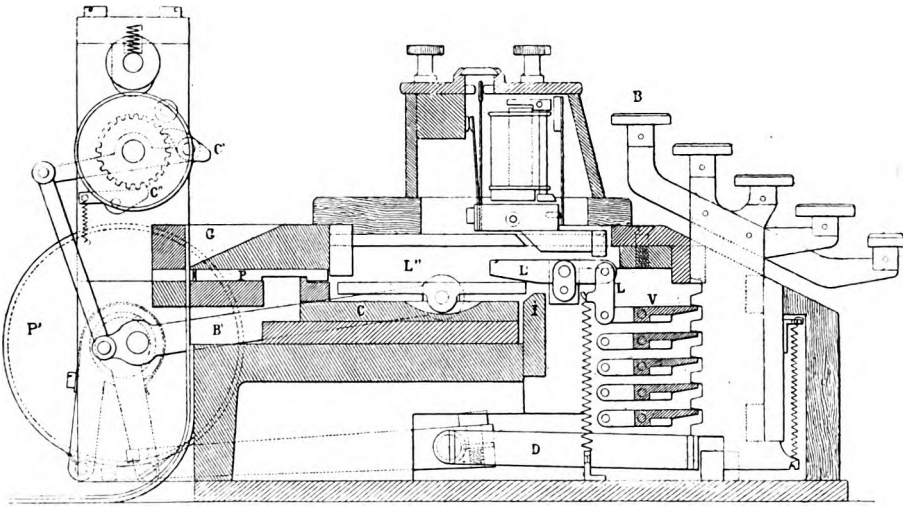


Fig. 15. — Perforateur Carpentier.

Carpentier. Le perforateur (*fig. 15*) est disposé comme une machine à écrire; chaque bouton, B, est prolongé par une lame dont les saillies et les creux figurent la combinaison qui, dans le code Baudot, correspond à la lettre ou au signe marqué sur ledit bouton. Cinq volets horizontaux, V, sont entraînés par les reliefs lors de l'abaissement des boutons; chacun d'eux porte, articulée sur son extrémité postérieure, une bielle, L, qui le rend solidaire d'un levier, L', lequel fait pivoter, à son tour, un levier basculant, L'', dont l'extrémité postérieure vient alors se placer devant le poinçon, P.

» Les leviers oscillants sont montés sur un chariot mobile, C: il suffit donc de communiquer au chariot un mouvement d'avant en arrière pour que les poinçons, poussés par les leviers soulevés, viennent perforer la bande qui passe dans la gouttière G. La figure 16 montre une bande ainsi préparée, portant les mots *perforateur alphabétique*; les trous sont disposés dans le même ordre

que les touches d'un manipulateur, ce qui permet à l'opérateur de contrôler aisément son travail. Dès que le signal est perforé, le cha-

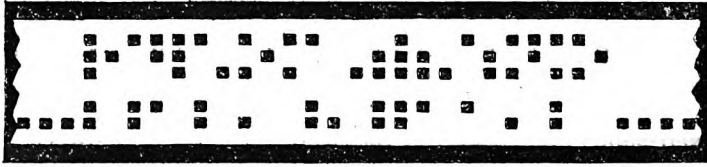


Fig. 16. — Bande de transmission Carpentier.

riot revient en arrière et les leviers L, rencontrant un plan incliné I, reprennent leur position de repos.

» Le mouvement est donné au chariot par l'intermédiaire d'une bielle, B', et d'une poulie, P'; celle-ci, folle sur son axe, tourne sous l'action d'un moteur électrique; un frein à corde permet de l'embrayer pour une révolution seulement, par l'intermédiaire du levier D qui, entraîné par tous les boutons quels qu'ils soient, libère l'embrayage au moment du relèvement.

» Le transmetteur automatique, dans lequel la bande est engagée au sortir du perforateur, comprend un fort électro-aimant, dans lequel le distributeur envoie un courant à chaque tour des balais; son armature, A (fig. 17), par l'intermédiaire d'un levier L,

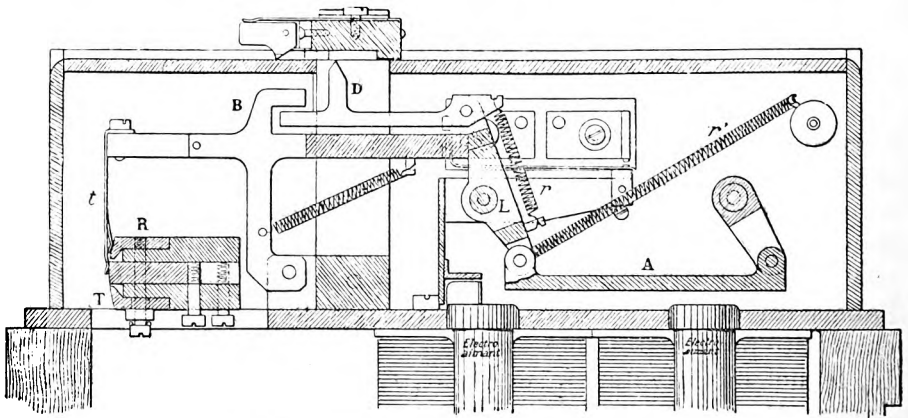


Fig. 17. — Transmetteur automatique Carpentier.

imprime un mouvement longitudinal de va-et-vient à cinq cliquets, D, guidés par un peigne fixe, au-dessus duquel passe la bande perforée.

» Lorsque l'armature A de l'électro-aimant est attirée, les cinq cliquets sont déplacés vers la droite; sous l'action de leur ressort r,

ceux d'entre eux auxquels la bande présente un trou y pénètrent par leur bec, D; dès que l'armature est ramenée par son ressort antagoniste r' , la bande est entraînée vers la gauche par ceux des cliquets qui ont ainsi pénétré dans un trou; en outre, chacun de ces cliquets rencontre la branche coudée d'un levier, B, sur lequel est monté un ressort de transmission, t : celui-ci, quittant la butée supérieure R, à laquelle est rattachée la pile de repos, vient au contact de l'autre butée, T, reliée à la pile de travail; les leviers B, qui remplacent ici les touches d'un manipulateur, communiquent avec les contacts du distributeur, et le signal est expédié dans les mêmes conditions qu'avec la transmission manuelle.

» **Multiple Delany.** — Le multiple Delany, installé en Angleterre en 1885, permet d'effectuer quatre ou six transmissions Morse simultanées; les opérateurs n'ont pas, comme au Meyer ou au Baudot, à suivre une cadence quelconque et transmettent comme s'ils étaient seuls à utiliser la ligne. A cet effet, le distributeur sextuple, par exemple, est divisé en 162 contacts groupés par secteurs de six; les contacts n° 1 de chaque secteur sont reliés ensemble et à un premier appareil; les contacts n° 2 sont rattachés de même à un second appareil, et ainsi de suite jusqu'au sixième. Les contacts étant extrêmement petits les signaux transmis par chaque appareil, bien que hachés, gardent, à l'arrivée, une continuité apparente qui suffit pour qu'ils restent traduisibles.

» Afin d'obtenir le synchronisme rigoureux indispensable à une telle correspondance, l'inventeur a employé, pour produire le mouvement, le moteur phonique, inventé vers 1865 par Paul Lacour: les branches d'un électro-diapason sont utilisées pour envoyer, à chacune de leurs vibrations, un courant dans un électro-aimant en regard duquel tourne une roue dentée, en fer, appelée *roue phonique*; chaque aimantation exerce une action sur la dent qui se trouve à proximité: accélération si la dent s'approche des noyaux, retard si elle s'en éloigne, et la résultante de ces diverses actions est un mouvement uniforme; on dispose, aux deux extrémités de la ligne, deux électro-diapasons vibrant à l'unisson pour obtenir le synchronisme. Toutefois, étant donné qu'il suffit d'une légère variation de température, par exemple, pour altérer le régime vibratoire de l'un des diapasons, un système correcteur assure les rectifications périodiques nécessaires.

» **Multiple Rowland.** — Le quadruple Rowland, essayé en France, en Angleterre et en Allemagne (1900-1901), emploie, pour

la transmission des signaux, les courants fournis par une machine génératrice de courants alternatifs; le distributeur est du type quadruple et comprend 48 contacts par couronne; le balai de transmission est entraîné directement par l'axe de la génératrice et calé de telle sorte que son passage sur chaque contact correspond exactement à une demi-période. Le code des signaux est établi de la façon suivante : chaque secteur comprend 11 contacts, ce qui correspond à l'envoi sur la ligne de cinq périodes et demie, soit une

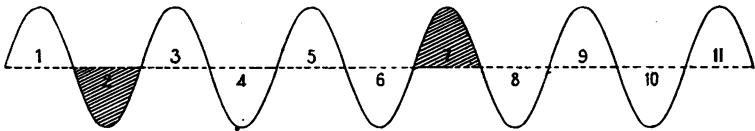


Fig. 18. — Formation d'un signal Rowland.

suite de 11 ondes alternées; chaque signal est formé par la suppression de deux ondes non consécutives de cette suite (*fig. 18*); on dispose ainsi d'un nombre de combinaisons égal à la somme des neuf premiers nombres ($11 - 2$), soit 45.

» La transmission est effectuée à l'aide d'un clavier dont chaque touche produit la sélection des ondes à supprimer et est manœuvrée en cadence, comme au Baudot manuel.

» A l'arrivée, les courants alternés sont reçus dans un relais; lorsqu'aucun signal ne parvient, l'armature de ce relais se déplace 11 fois entre ses deux butoirs pendant que le balai de réception parcourt un secteur; dans ces conditions, elle envoie des courants, positifs par les contacts impairs et négatifs par les contacts pairs, dans 11 relais-combinateurs dont les armatures sont mises ainsi sur le butoir dit *de repos*. Si, par exemple, une onde paire est supprimée, le relais récepteur reste sur le butoir où l'a placé l'onde impaire précédente et envoie ainsi dans le relais pair correspondant un courant positif qui le place sur travail; et inversement. Lorsque les balais ont franchi le secteur, l'ensemble des relais figure donc une combinaison de neuf armatures sur repos et deux sur travail; la traduction en caractères typographiques a lieu à l'aide d'un dispositif analogue au combinateur électrique de Baudot (*voir p. 398*).

» L'impression a lieu sur une bande large de 15 cm qui est amenée *au vol* contre une roue des types; cette bande est perforée transversalement de distance en distance pour permettre de la détacher en feuilles après la réception de chaque message.

» Le synchronisme est obtenu à l'aide d'une seconde armature que commande le relais récepteur : cette armature oscille, comme

l'autre, suivant le rythme qui correspond à la fréquence des courants alternatifs venant de la ligne, et envoie des impulsions inversées dans un petit moteur alternatif, monté sur l'axe du récepteur et tournant avec lui sous l'action d'un moteur principal; ces impulsions exercent une action régulatrice sur l'ensemble et, à la condition que le moteur principal ait été réglé, au préalable, pour une vitesse aussi voisine que possible de celle du correspondant, le moteur auxiliaire lui vient en aide lorsqu'il tend à rester en arrière ou freine quand il veut prendre de l'avance, et l'on obtient, en définitive, un synchronisme très précis.

» Un tel système ne se prête pas à l'alternat, comme le quadruple Baudot (*voir* p. 397), c'est-à-dire que, pour établir une correspondance permanente entre deux postes, le montage en duplex est absolument indispensable. Il n'a pas été admis en France ni en Angleterre et a été abandonné en Allemagne après cinq ans d'essais; la cause principale de cet insuccès réside dans les influences d'induction exercées par les courants alternatifs sur les circuits voisins. L'appareil Rowland était cependant encore utilisé, ces tous derniers temps, sur une ou deux lignes italiennes.

» **Système Baudot-Dubreuil.** — Le système Dubreuil emploie des distributeurs et des relais identiques à ceux de Baudot; il ne peut donc prétendre à un meilleur rendement de la ligne par rapport à ce dernier; il vise seulement à augmenter le rendement individuel des opérateurs. Dans ce but, l'inventeur songea à utiliser, pour la préparation des combinaisons, un nombre de doigts plus grand que le Baudot: le nombre des combinaisons se trouverait considérablement accru, puisqu'il est égal à $2^n - 1$; on ne pouvait cependant songer à atteindre le maximum par l'utilisation des dix doigts, malgré l'attrait des 1023 combinaisons qu'on aurait trouvées, car la fatigue physique et cérébrale, qu'on aurait ainsi imposée au personnel, aurait entraîné, sans aucun doute, une dépréciation sensible du rendement.

» On s'en est donc tenu à un clavier de huit touches, qui fournit le chiffre, déjà très intéressant, de 255 combinaisons; afin de ne pas modifier du tout au tout le mode de traduction, ces huit touches ont été divisées en deux groupes (*fig.* 19), l'un de 5, qui sert à former les 31 combinaisons du code Baudot ordinaire; le second de trois touches, à l'aide duquel on peut exécuter sept combinaisons supplémentaires; ces trois touches constituent simplement la répétition des trois premières du code Baudot; elles permettent donc de transmettre six voyelles et un blanc de séparation. En

agissant simultanément sur les deux groupes, on peut expédier, dans une même révolution des balais, deux lettres, l'une avec les cinq premières touches, l'autre avec les trois supplémentaires.

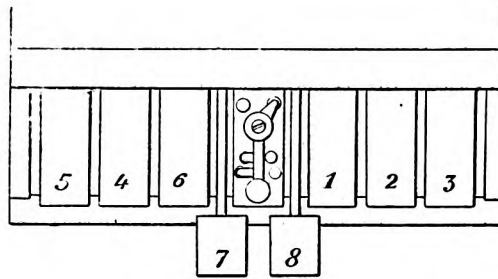


Fig. 19. — Manipulateur Dubreuil.

» Le traducteur renferme deux combineurs, l'un correspondant au groupe de 31 combinaisons, l'autre à celui de 7; ils sont calés comme l'indique la figure 20, c'est-à-dire que les chercheurs de l'un entrent en action dès que ceux de l'autre ont terminé leur explo-

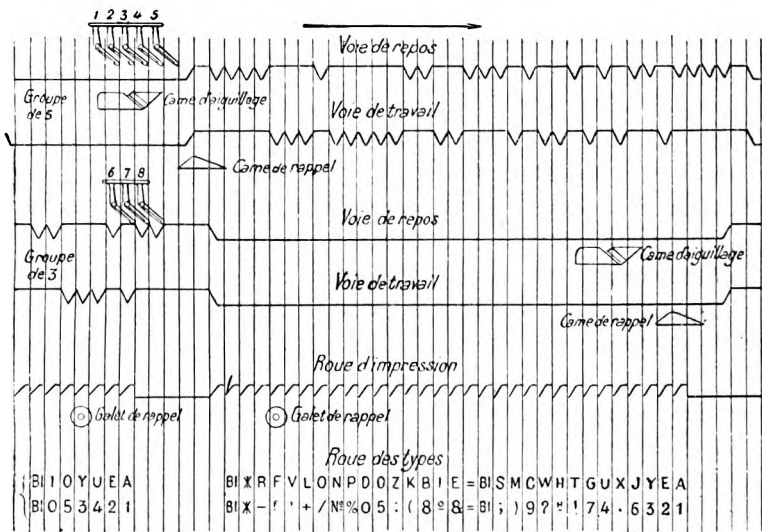


Fig. 20. — Développement du traducteur Dubreuil.

ration; la roue des types, développée au bas de la figure, porte également deux groupes de caractères, séparés par deux espaces vides, correspondant à l'aiguillage des chercheurs et au rappel au repos du bras d'impression.

» Le traducteur Dubreuil ne diffère que peu du traducteur Baudot, aussi son entretien peut-il être confié, pour ainsi dire sans initiation préalable, aux dirigeants du Baudot; les distributeurs à vingt contacts (triple Baudot) ou à 35 contacts (sextuple Baudot) peuvent devenir respectivement, et sans aucune modification, un double ou un quadruple Dubreuil. Des calculs exacts permettent d'évaluer le rendement d'un secteur Dubreuil au $\frac{2}{3}$ de celui d'un secteur Baudot.

» **Multiples Murray, Western-Union Telegraph Cy et Western-Electric Cy.**
— Le multiple Murray est un Baudot destiné à fonctionner exclusivement en duplex; l'inventeur a cédé, en 1912, à la Western-Union Telegraph Cy, ses droits pour l'exploitation de ses brevets en Amérique; cette Compagnie mit bientôt en service des installations munies de récepteurs construits par la Western-Electric Cy; puis cette dernière établit à son tour des installations complètes, dont la ressemblance avec le Murray est frappante, de telle sorte qu'il serait assez délicat, après un tel enchevêtrement, de vouloir établir une démarcation bien nette entre les trois propriétés. C'est d'ailleurs ce que le Post Office anglais a renoncé à faire, puisque, dans tous les contrats qu'il passe avec l'une ou l'autre des parties, il a toujours soin de mentionner qu'il entend rester étranger aux revendications qui pourraient surgir par ailleurs ⁽¹⁾.

» Quoi qu'il en soit, les distributeurs de cette catégorie sont dépourvus de contacts de propagation et aussi de contacts de correction: le synchronisme est maintenu *sans courants spéciaux*, suivant un dispositif inspiré de celui de Picard (voir p. 398); ce dispositif compliqué était tout indiqué sur les câbles sous-marins, où le triple frôle d'assez près la limite tolérée par ce genre de conducteurs; sur les lignes aériennes, son emploi est discutable et fera l'objet, un peu plus loin, d'un examen spécial. La suppression des contacts de propagation exclut radicalement la possibilité d'alterner les transmissions à chaque révolution des balais et *impose l'emploi du duplex dans tous les cas*; c'est là un autre point faible qui sera examiné en son temps.

» Le code employé est celui de Baudot, mais l'alphabet est très différent, c'est-à-dire que les combinaisons ne correspondent pas aux mêmes lettres dans l'alphabet Baudot et dans celui qu'emploient les trois systèmes examinés. La transmission est exclu-

(1) *The Post Office Electrical Engineers Journal*, avril 1917, p. 20.

sivement automatique et a lieu à l'aide de bandes perforées par un appareil genre machine à écrire et un transmetteur analogues à ceux de Carpentier (voir p. 403). L'avantage de la transmission automatique sur la transmission manuelle n'est pas à démontrer, tant au point de vue du rendement individuel qu'à celui de la fatigue résultant d'un travail donné.

» Les traducteurs sont de différents types, mais tous donnent l'impression sur feuilles et non sur bande; les qualités et les inconvénients de ce mode de traduction seront également examinés plus loin.

Dispositifs permettant d'augmenter le rendement des lignes.

» Il convient de mentionner ici divers dispositifs qui ne constituent pas, à proprement parler, des systèmes télégraphiques, mais qui concourent au même but que ceux qui viennent d'être examinés : augmenter le rendement des lignes. Ils peuvent, en principe, s'appliquer à tous les systèmes quels qu'ils soient.

» **Montage en Duplex.** — On appelle *duplex* les arrangements qui permettent de transmettre par le même fil et au même instant deux signaux en sens inverse. Il importe de faire ressortir la différence essentielle qui existe entre le *duplex* et le *multiple* : quand on regarde fonctionner un multiple, les transmissions semblent *simultanées* alors qu'elles sont, en réalité, *successives*. Dans le duplex, au contraire, les deux signaux de sens inverse peuvent être lancés à un moment rigoureusement le même, et tout se passe comme s'ils se chevauchaient au milieu de la ligne pour poursuivre chacun leur direction, l'un dans le sens AB, l'autre dans le sens BA. On compte un assez grand nombre de solutions à ce problème : la méthode la plus simple est celle du pont de Wheatstone :

» Le manipulateur M est rattaché à la tête du pont P (fig. 21), et le fil de ligne à l'extrémité de l'une des branches *a*; à l'extrémité de l'autre branche *b*, on connecte une *ligne artificielle*, composée de résistances et de capacités échelonnées; le récepteur R est placé dans la diagonale. On équilibre le pont à la façon ordinaire, en agissant sur la ligne artificielle (les deux branches *a* et *b* restant invariables) jusqu'à ce qu'un galvanomètre, mis à la place du récepteur R, reste insensible aux courants émis par le manipulateur. Dans ces conditions, la transmission n'influence pas le récepteur tant que le correspondant est au repos, mais, dès qu'il transmet,

l'équilibre du pont est troublé et les courants qui traversent la diagonale font fonctionner le récepteur.

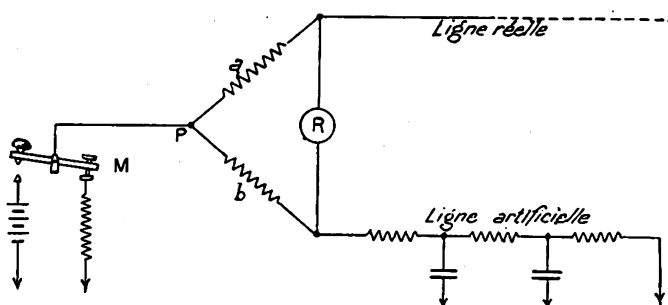


Fig. 21. — Duplex en pont de Wheatstone.

» **Multiplex Mercadier.** — Le multiplex Mercadier est une application du principe établi, en 1860, par l'abbé Laborde, qui démontra que les courants ondulatoires de fréquences différentes, émis sur une même ligne, se superposent sans se confondre, et que chacun d'eux, traversant un certain nombre de récepteurs, met en vibration celui avec lequel il est accordé, et celui-là seulement.

» Mercadier réussit à installer ainsi jusqu'à 12 transmissions Morse sur un même circuit à deux fils; puis avec la collaboration de M. Magunna, qui fut aussi son continuateur, il parvint à superposer plusieurs appareils Hughes travaillant en courants ondulatoires et un Baudot utilisant le courant continu.

» La figure 22 représente schématiquement l'ensemble d'une installation : un certain nombre de diapasons D, vibrant à des notes différentes et entretenus électriquement, engendrent chacun des courants ondulatoires dans le primaire d'un transformateur T, dont le secondaire peut être mis en relation, par l'intermédiaire d'un manipulateur quelconque, Morse par exemple, avec un circuit commun C. Lorsqu'on actionne l'un ou plusieurs de ces manipulateurs, les courants harmoniques sont amenés, par le circuit C, dans le primaire d'un transformateur T', qui comprend deux secondaires dont le rôle sera indiqué plus loin.

» A l'arrivée, les courants sont renvoyés, par le transformateur différentiel T'', dans le circuit commun de réception C', où sont placés en série les différents récepteurs monotéléphoniques : chacun de ceux-ci vibre sous l'action des courants qui lui sont destinés. La réception Morse se fait au son; pour le Hughes et autres systèmes, les monotéléphones sont agencés pour servir de relais

et actionner, lorsqu'ils sont eux-mêmes mis en vibration, les récepteurs de ces appareils.

» Les courants de transmission, lorsqu'ils traversent le transformateur T' , se reproduisent également dans le secondaire de gauche et traversent le secondaire du même côté du transformateur T'' .

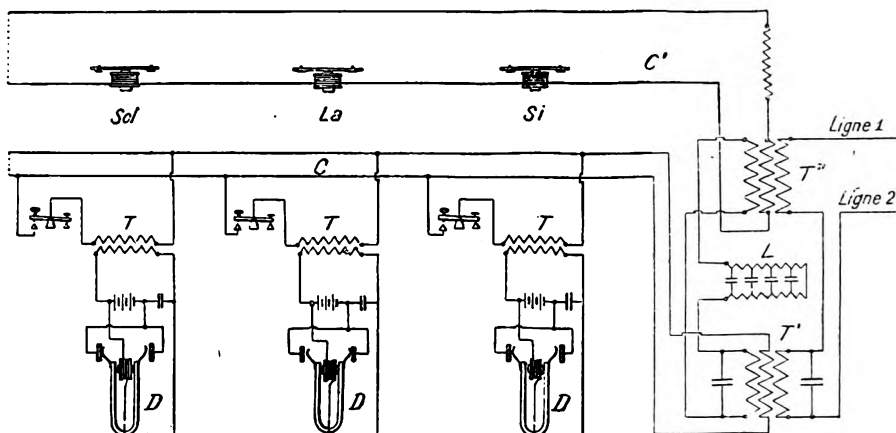


Fig. 22. — Multiplex Mercadier.

La ligne artificielle L permet de régler l'intensité du courant qui circule dans ce *circuit d'extinction* et de le rendre égal à celui du circuit de ligne; on décale l'un par rapport à l'autre d'une demi-période en faisant varier le rapport des capacités de deux condensateurs placés à droite et à gauche du transformateur T' : les deux actions sur le circuit de réception C' s'annulent et ce circuit reste muet; si, au même moment, le correspondant transmet, soit avec les mêmes notes, soit avec d'autres, les signaux se croisent avec les précédents, dans chaque installation, sans s'influencer réciproquement. On peut ainsi, sur un même circuit, effectuer dans les deux postes autant de transmissions et de réceptions qu'il y a de manipulateurs et de récepteurs.

» **Dispositifs divers.** — Dans le même ordre d'idées, on peut encore citer divers dispositifs qui permettent d'échanger plusieurs transmissions simultanées à l'aide d'appareils de différents systèmes : tels sont le *dispositif de Pierre Picard*, à l'aide duquel on superpose une transmission en courants vibrés et une en courant continu; les *dispositifs de télégraphie et téléphonie simultanées*, qui utilisent les circuits téléphoniques en exploitation pour les transmissions télégraphiques, etc.

Comparaison entre les différents systèmes.

» Les différents systèmes de télégraphie rapide qui viennent d'être énumérés peuvent être comparés entre eux, soit au point de vue du mode de transmission, soit à celui du code de signaux qu'ils emploient, soit enfin par des qualités ou des défauts spéciaux à chacun d'eux. Il est bien entendu que tous, sans exception, fonctionnent de façon parfaite et que, par suite, ce facteur n'entrera pas en ligne de compte; pas davantage on ne fera état de ce qu'ils sont ou ne sont pas exploités en duplex : en effet, contrairement à un préjugé entretenu par les promoteurs de certains systèmes, il ne faut pas perdre de vue que *c'est la ligne qu'on duplexe et non l'appareil*, et l'on doit admettre, en principe, que tous sont susceptibles de fonctionner en duplex lorsque la ligne est duplexable; si quelques-uns d'entre eux sont utilisés en simplex, cela tient uniquement à des considérations d'exploitation, et il serait absolument erroné d'en tirer une autre conclusion.

» **Systèmes automatiques et systèmes multiples.** — La transmission automatique étant employée dans les installations multiples, il importe d'établir une terminologie qui évite toute confusion : on appellera donc *automatiques simples* les systèmes dans lesquels un seul appareil transmetteur écoule le travail préparé par plusieurs opérateurs, et *automatiques multiples* ceux dans lesquels la transmission est effectuée par secteurs indépendants.

» Dans les systèmes automatiques simples, la composition préalable permet d'alimenter au maximum les lignes à grand trafic; il suffit de préposer à cet effet un nombre suffisant d'opérateurs pour que l'appareil transmetteur ne chôme jamais; au point de vue du travail fourni par ceux-ci, l'emploi de claviers agencés comme des machines à écrire offre le double avantage d'un apprentissage très court et d'un meilleur rendement individuel.

» A côté de ces qualités incontestables, la transmission automatique simple présente l'inconvénient de retarder sensiblement l'acheminement des télégrammes, par comparaison avec les autres modes de transmission. Voici, en effet, les étapes que chacun d'eux doit suivre :

» 1^o On le perfore. Cette opération se fait par séries de 5 ou de 10 télégrammes, de sorte que le premier attend nécessairement la terminaison du dernier avant de pouvoir être remis au *dirigeur* chargé du transmetteur automatique.

» 2^o La série perforée attend son tour de transmission; ce temps peut être assez long si la ligne n'est pas exploitée en duplex et si la série est remise pendant que le poste reçoit.

» 3^o Elle est engagée dans le transmetteur automatique.

» 4^o Une fois reçue à l'autre poste, elle est détachée, enregistrée, et attend son tour de traduction (cas du Wheatstone, où la transcription est faite manuellement). Ce délai peut, il est vrai, être abrégé si l'on dispose d'un nombre d'employés suffisant pour qu'on en trouve toujours un de disponible au moment où la série est reçue; mais, dans ce cas, le rendement moyen du personnel se trouve sensiblement diminué.

» Le temps qui s'écoule entre la perforation au départ et la transcription à l'arrivée et qui, dans les conditions les plus favorables, n'est pas inférieur à 20 minutes, constitue ce qu'on pourrait appeler le *retard normal* subi par tout télégramme arrivant sans encombre. Mais si une altération quelconque vient à être constatée, qu'elle provienne d'une fausse touche du dactylographe ou de la lecture incorrecte d'un texte mal écrit, ou bien encore qu'elle ait pour cause une défaillance de l'appareil ou de la ligne, le *retard normal* se trouve considérablement aggravé : la demande de rectification doit suivre toute la filière indiquée pour les télégrammes. Lorsqu'elle est parvenue à l'autre poste et remise au dactylographe intéressé, celui-ci a déjà perforé bon nombre d'autres séries, parmi lesquelles il doit rechercher la copie à rectifier, d'où une nouvelle perte de temps. Lorsqu'il l'a trouvée, la répétition du passage tronqué reprend le même chemin en sens inverse; bref, on peut dire que tout télégramme incidenté est un télégramme *sacrifié*, même si l'on excepte le cas de malentendu toujours possible, par suite de demandes ou de réponses trop abrégées, par exemple. Dans ce dernier cas, il n'est pas rare que les deux dirigeants doivent suspendre la transmission automatique et s'entendre, à l'aide de la transmission manuelle, pour liquider une situation embrouillée, ce qui arrête complètement le trafic et déprécie d'autant le rendement moyen.

» Ce tableau n'est pas noirci à plaisir, non seulement il résulte de l'expérience acquise autrefois en France, mais son exactitude est confirmée par le service anglais qui, jusqu'à ces temps derniers, a fait usage du Wheatstone et de systèmes similaires ⁽¹⁾. Le retard normal est un peu diminué lorsqu'on travaille en duplex, en ce

(1) *The Post Office Electrical Engineers Journal*, avril 1917, p. 14.

sens que les télégrammes à transmettre et les rectifications n'ont pas à attendre qu'on ait fini de recevoir; quoi qu'il en soit, si l'on veut, non pas supprimer mais seulement atténuer les retards, on doit augmenter le nombre des opérateurs et surtout créer des postes spéciaux pour la recherche des rectifications ⁽¹⁾, d'où une diminution sensible du rendement individuel moyen et une exploitation plus onéreuse.

» Au Baudot, avec la transmission manuelle, une lettre manipulée est aussitôt imprimée au poste correspondant et le retard normal se trouve absolument nul; avec la transmission automatique par secteurs, il demeure à peu près négligeable, car on n'a jamais à attendre un tour de rôle pour transmettre; de plus il n'est pas nécessaire qu'une série soit entièrement perforée pour engager la bande dans le transmetteur automatique: elle peut y être introduite dès qu'elle atteint une longueur de 40 à 50 cm, c'est-à-dire après 1 ou 2 minutes; et, comme un dactylographe frappe toujours plus de trois lettres par seconde (vitesse de rotation des balais), il prend nécessairement de l'avance sur l'appareil. A l'arrivée, le retard normal devient nul, la réception ayant lieu dans les mêmes conditions qu'avec la transmission manuelle.

» Les secteurs Baudot sont groupés par paires, comprenant chacune une transmission et une réception: les demandes de rectifications sont transmises entre deux télégrammes et arrivent immédiatement à l'agent transmetteur de l'autre poste; elles concernent donc toujours un télégramme de la série en cours ou l'un des derniers de celle qui vient d'être terminée, et les pertes de temps sont réduites au minimum; enfin, les désaccords ou malentendus, s'il vient à s'en produire, sont réglés *directement* par les intéressés, ce qui en abrège considérablement la durée.

» **Code Morse et Code Baudot.** — Chaque code de signaux a une capacité de rendement qui lui est propre et il s'ensuit que deux appareils, fonctionnant également bien, peuvent avoir des qualités très différentes suivant leur mode de formation des signaux.

» Si on laisse de côté les chiffres et les signes de ponctuation, dont l'usage est relativement restreint, on trouve que le code Morse comprend 30 lettres, représentant 98 signaux, soit 49 points et 49 traits. Or, si l'on appelle *moment* le temps minimum qu'on doit donner à une émission pour qu'elle soit enregistrée correctement

(1) *The Telegraph and Telephone Journal*, décembre 1910, p. 40.

à l'extrémité d'une ligne donnée, on voit qu'un point représente deux moments, un pour le courant de travail et un pour le courant de repos qui suit, soit, pour les 49 points de l'alphabet, 98 moments; les traits, trois fois plus longs, et suivis d'un courant de repos, absorbent 4 moments, soit, pour 49 traits, 196 moments, et l'on obtient ainsi pour l'alphabet entier, sans espacement des lettres, 294 moments, ou une moyenne de 9,8 par lettre.

» Si l'on tient compte de ce que les lettres les plus usitées ne comprennent qu'un nombre restreint de signaux, cette moyenne se trouve ramenée à 7, dans l'hypothèse où les chiffres seraient transmis exclusivement en abrégé (ce qui n'est pas toujours le cas) et où les signes de ponctuation seraient assez rarement employés pour que la majoration qu'ils entraînent devienne négligeable.

» Cette moyenne de 7 moments doit être augmentée de deux, pour l'espacement des lettres, égal à un point, ce qui l'établit à 9. Si la transmission est comptée en mots de 5 lettres, comme on l'admet généralement, il faut encore ajouter 6 moments pour l'espacement des mots (3 points), ce qui donne un total par mot de $(5 \times 9) + 6 = 51$ moments.

» Si, donc, une ligne est susceptible de supporter n émissions par minute, le rendement théorique, avec le code Morse, ressort à $\frac{n}{51}$ mots.

» Avec le code Baudot, la formation d'une lettre, d'un chiffre ou d'un signe quelconque exige 5 moments, sans majoration, puisque la progression est opérée mécaniquement; si l'on compte, comme précédemment, les mots pour 5 lettres, on aura donc 25 moments, auxquels il faudra en ajouter 5 pour le blanc, soit, au total, 30 moments pour un mot. Sur une ligne pouvant recevoir, comme ci-dessus, n émissions, on pourra transmettre, dans 1 minute, $\frac{n}{30}$ mots.

» Il résulte de cette comparaison que, toutes choses égales d'ailleurs, on améliorera le rendement en choisissant le code Baudot; si, par exemple, $n = 6000$ par minute, les codes Baudot et Morse pourront donner respectivement 200 et 117 mots, ce qui fait ressortir à l'avantage du premier 83 mots par minute, soit un bénéfice d'environ 71 pour 100.

» **Autres codes.** — Deux systèmes, parmi ceux qui ont été examinés ici, emploient d'autres codes que ceux de Morse et de Baudot, ce sont le Rowland et le Pollak-Virag.

» Le Rowland (voir p. 405) emploie des courants alternatifs d'environ 100 périodes; chaque lettre est formée de 11 demi-périodes dont deux sont supprimées. La fréquence du courant alternatif, qui circule dans la ligne et dans le relais récepteur, ne saurait être modifiée par les qualités électriques de ceux-ci et, dans ces conditions, la vitesse de transmission n'est limitée que par l'inertie mécanique du relais. Or, le système, tel qu'il a été expérimenté, ne donne pas un rendement supérieur à celui du Baudot; on est donc fondé à penser que l'inventeur n'a pas tiré tout le parti possible du principe dont il a tenté l'application.

» Le Pollak-Virag est, sans conteste possible, le plus rapide de tous les appareils actuellement connus; cette supériorité tient à ce que les deux récepteurs téléphoniques n'ont que 50 millihenrys de self et 200 ohms de résistance; leur constante de temps $\frac{L}{R}$, ne dépasse pas 0,00025 seconde, tandis que celle d'un relais Baudot atteint $\frac{1,3}{200} = 0,0065$; si l'on ajoute à cela que l'inertie mécanique des membranes est pratiquement inappréciable, on voit que ce système possède des qualités de rapidité incomparables.

» **Conclusion provisoire.** — De l'analyse qui précède, il résulte que la préférence doit se porter :

» 1^o Vers les systèmes à transmission multiple;

» 2^o Vers ceux qui emploient le code Baudot, le Rowland et le Pollak-Virag étant éliminés pour des raisons auxquelles le code employé reste étranger.

» On se trouve amené, finalement, à établir la comparaison définitive entre les systèmes multiples à code Baudot, c'est-à-dire le Baudot, le Murray, le Western-Union et le Western-Electric.

» **Système Baudot et systèmes anglo-américains.** — La similitude déjà signalée, qui existe entre les systèmes Murray, Western-Union et Western-Electric, leur donne des qualités et des défauts communs; il sera donc avantageux, pour la facilité de la comparaison qui va suivre, de les grouper sous l'appellation générale de *systèmes anglo-américains*. Il est à peine besoin d'ajouter que ladite comparaison sera faite en se gardant, avec un égal souci, de deux sentiments inadmissibles dans une discussion technique : le nationalisme étroit, qui consisterait à défendre le Baudot envers et contre tous, simplement parce qu'il est français, et le *snobisme*, qui incite certaines gens à s'extasier, sans con-

trôle préalable, devant tout ce qui vient de l'étranger. Les conclusions qui en seront tirées auront, tout au moins, le mérite d'être absolument impartiales.

» **Transmetteurs.** — La transmission manuelle a été, jusqu'ici, exclusivement usitée au Baudot; des essais de transmission automatique, avec le système Carpentier, ont été faits, il est vrai, dès 1903; mais ces essais ont eu lieu dans de mauvaises conditions, qui n'ont pas permis de conclure dans un sens ni dans l'autre, et l'Administration se proposait de reprendre les expériences de façon plus normale; après un retard dû à la guerre, elles vont avoir lieu très prochainement, et mettront en concurrence les différents systèmes actuellement en usage; il n'est pas douteux qu'une solution définitive pourra alors intervenir. La transmission automatique par secteurs, en effet, est avantageuse, tant au point de vue du rendement par opérateur qu'à celui de la fatigue correspondant à un travail donné. En outre, ainsi qu'il a été mentionné plus haut (*voir* p. 415), elle échappe, presque complètement, aux critiques qui s'appliquent à la transmission automatique simple, telle qu'on la pratique au Wheatstone, par exemple.

» **Récepteurs.** — Le traducteur Baudot, simple, robuste et d'un réglage facile, donne toute satisfaction; toutefois, il imprime sur bande, alors que les appareils anglo-américains traduisent sur feuilles.

» La question de l'impression en colonne a été très controversée : elle affranchit l'agent réceptionnaire du collage des bandes qui, il faut le dire, n'entre que pour une très faible part dans l'ensemble de son travail, le comptage des mots, la vérification des collationnements, les demandes de rectifications et la notification de celles-ci constituant, en réalité, le plus clair de ses préoccupations.

» D'un autre côté, pour ce qui concerne les télégrammes à distribuer au public, la bande portant l'adresse du destinataire est collée directement sur la patte de la formule bleue, qu'il suffit de plier ensuite pour que la correspondance soit parfaitement à l'abri des indiscretions. Si l'on reçoit en feuilles, l'adresse doit être transcrite sur une enveloppe et, sans parler des chances d'erreurs ou d'interversions qu'entraîne cette transcription, on y perd amplement le bénéfice qu'on prétend trouver dans la suppression du collage des bandes.

» L'impression sur feuilles n'augmente donc pas le *rendement-agent*; par contre, elle *diminue* le *rendement-ligne* : en effet, elle

, rend nécessaire l'emploi de signaux accessoires, tels que l'inversion indépendante du blanc, soit deux signaux pour passer d'un groupe de lettres à un groupe de chiffres, le retour en arrière du chariot arrivé au bout de sa course, le changement de ligne, distinct du précédent et employé non seulement quand on ramène le chariot à son point de départ, mais encore répété un nombre plus ou moins grand de fois après chaque télégramme, pour dégager la feuille et permettre de la couper à une dimension convenable. Cette perte de rendement, dans le traducteur Murray, atteint 7 à 8 pour 100 et, dans celui de la Western-Electric, n'est pas inférieure à 15 pour 100.

» On a dit encore que les copies imprimées sur feuilles sont plus présentables pour être remises au public; ceci est vrai pour les télégrammes parvenant sans encombre, mais il n'en est pas de même pour ceux qui arrivent incorrects : dans ce cas, la rectification doit être faite à la plume et, si elle est importante, ou si l'aspect du télégramme doit y perdre par trop, on n'a pas d'autre ressource que de faire répéter le message en entier, d'où une nouvelle perte de rendement (1).

» Actuellement, en France, les différentes catégories de télégrammes, arrivée, transit, priorité, mandats, sont différenciées par la couleur des formules sur lesquelles on colle les bandes (respectivement bleues, roses, jaunes, vertes), ce qui facilite grandement le tri et évite les fausses directions; l'impression sur feuilles supprime cette différenciation et, avec elle, un avantage certain.

» Le traducteur Kleinschmidt, employé par la Western-Union, présente une certaine analogie avec le traducteur Eglin, sauf qu'il imprime sur feuilles; il a l'aspect extérieur d'une machine à écrire dans laquelle le clavier est remplacé par cinq réglettes, avec entailles et saillies constituant un combinateur basé sur le même principe que celui de Baudot; il est très délicat et sujet à de fréquents dérangements.

» La Western-Union fait également usage d'un traducteur Morkrum, comportant une roue des types avec deux séries de caractères et un dispositif d'inversion; le combinateur présente cette particularité qu'il est composé seulement de quatre plaques avec encoches et reliefs; il ne sélectionne donc que 16 combinaisons; le cinquième électro-aimant détermine la rotation de la roue des types soit à droite, soit à gauche, et d'un nombre de divisions déterminé par la combinaison du mouvement des plaques, ce qui constitue le cinquième élément de sélection; les plaques et le dis-

(1) *The Telegraph and Telephone Journal*, décembre 1916, p. 42.

positif de rotation de la roue des types sont commandés par un mécanisme de percussion et de détente analogue à celui des armes à feu, ce qui assure une grande rapidité aux mouvements; plus robuste que le précédent, il est aussi plus compliqué.

» Le traducteur de la Western-Electric est à fonctionnement entièrement électrique; il est très volumineux et extrêmement compliqué; en outre des pièces purement mécaniques, il ne comprend pas moins de 26 relais ou électro-aimants, une quarantaine de contacts électriques, des shunts pare-étincelles, une bobine de self, etc.; la roue des types est petite et fragile; l'ensemble est délicat et d'un entretien difficile et coûteux.

» A ce point de vue particulier, dont l'importance sera indiquée plus loin, le traducteur Baudot est d'une simplicité et d'une robustesse incomparables : il comprend, en tout et pour tout, 6 électro-aimants (compris l'électro-frein), 5 leviers aiguilleurs, 5 leviers chercheurs et 2 disques combinateurs. Le système de déclenchement et d'impression, placé à l'extérieur, est simple et facilement accessible pour le réglage et l'entretien.

» Le traducteur Eglin est également très simple; il ne comprend que 7 électro-aimants; il imprime il est vrai sur bande, mais il semble qu'on pourrait lui adjoindre l'impression en pages sans le compliquer très sensiblement.

» **Distributeurs.** — Le moteur et le régulateur Baudot sont remplacés, dans les appareils anglo-américains, par le moteur à roue phonique déjà employé, en 1885, par Delany; bien que le régulateur Baudot donne un isochronisme *absolument parfait*, son réglage est quelque peu délicat et, en outre, il ne se prête pas facilement aux changements de la vitesse de régime; l'adaptation au Baudot de la roue phonique serait avantageuse sur les installations qui seront munies de la transmission automatique : en effet, avec la transmission manuelle, il y aurait inconvénient à modifier la vitesse, car on dérouterait les manipulants accoutumés à un certain rythme; avec la transmission automatique, au contraire, on pourrait mieux adapter la vitesse à l'état de la ligne et l'on y gagnerait certainement dans beaucoup de cas.

» Le fonctionnement mécanique de la correction est à peu près identique dans les différents systèmes étrangers, qui se sont largement inspirés de celui de Baudot; au point de vue électrique, toutefois, la correction anglo-américaine peut fonctionner plusieurs fois par tour, ce qui lui donne, en apparence tout au moins, une plus grande précision; il est à remarquer, cependant, que le syn-

chronisme au Baudot est *irréprochable*, bien que la correction ne puisse fonctionner, au maximum, qu'une fois par tour; cela tient, sans aucun doute, à ce que l'écart, qui apparaît à la fin de chaque révolution, est la somme algébrique de tous ceux qui se sont produits depuis la dernière correction; et comme cette somme algébrique ne dépasse guère un angle de 1° , on voit qu'il n'y a pas intérêt à multiplier le nombre des corrections. Enfin, en ce qui concerne la suppression des contacts spéciaux de correction, le dispositif de Pierre Picard se justifie sur les câbles sous-marins, où il a permis de remplacer, avec une majoration de trois contacts seulement, le double à 12 contacts par le triple à 15 : les contacts de correction, au double, représentaient donc $\frac{1}{6}$ du total, la même suppression, au sextuple Baudot employé sur la ligne Paris-Marseille (32 contacts à la transmission) ne donnerait qu'un bénéfice de $\frac{1}{16}$. Par contre, la correction sans courants spéciaux nécessite deux couronnes de plus au distributeur et trois relais employés exclusivement à la correction. D'une façon générale, le système correcteur anglo-américain est donc beaucoup plus compliqué que celui du Baudot; il est donc plus sujet à dérangement, et cela sans avantage tangible.

» La suppression des contacts de propagation (*voir* p. 397) est une modification franchement mauvaise, car, à côté du mince bénéfice qu'elle procure, au point de vue de l'utilisation de la ligne, elle rend obligatoire l'emploi du duplex pour assurer la communication dans les deux sens à la fois. Or, avec le réseau aérien, tel qu'il existe en France, le duplex, au delà de 400 km, devient extrêmement aléatoire; c'est-à-dire que, pour les communications de Paris avec les grandes centres, tels que Lyon, Marseille, Nice, Montpellier, Toulouse, Bordeaux, etc., il n'y faudrait pas songer. En outre, les distributeurs anglo-américains ne permettent pas de répartir les secteurs au gré des nécessités du trafic: un *double* en duplex, à supposer qu'il fonctionne bien avec Montpellier, ce qui n'est nullement démontré, donnerait bien quatre transmissions simultanées, comme le *quadruple Baudot actuel*, mais celles-ci seraient obligatoirement réparties à raison de deux dans chaque poste, même si le travail y est inégalement abondant, tandis qu'avec le quadruple simple, on peut à volonté donner trois transmissions au poste le plus encombré, l'autre n'en conservant momentanément qu'une seule. En un mot le système anglo-américain est *rigide*, tandis que le Baudot s'assouplit aux besoins du moment, et il en résulte une meilleure utilisation, c'est-à-dire, finalement, un meilleur rendement.

» **Rendement.** — Ainsi qu'il a été dit plus haut, le facteur *duplex* ne doit pas entrer en ligne de compte pour la comparaison qui va suivre, attendu que le Baudot, sur une ligne donnée, peut être aussi facilement duplexé que ses concurrents et que, si ce mode d'arrangement n'est que peu employé en France, c'est uniquement parce que les nécessités du trafic ne l'exigent pas et que, d'autre part, le réseau aérien ne s'y prête que sur des distances assez restreintes ⁽¹⁾.

» Le nombre d'émissions qu'on peut envoyer, dans un temps donné, dépend essentiellement des constantes, capacité et self, de la ligne sur laquelle on opère; d'autre part, le code étant le même, le rendement théorique des différents systèmes en présence doit être rigoureusement identique. On pourrait objecter que le distributeur quadruple Baudot a 24 contacts et que ses concurrents n'en ont que 20. Cette différence est plus apparente que réelle pour diverses raisons : d'abord parce qu'il est de notoriété courante que le duplex, obligatoire avec les appareils anglo-américains, entraîne toujours une diminution de la vitesse, par rapport à la transmission simple; ensuite parce que le quadruple, même avec les vitesses usitées par ces mêmes appareils, n'utilise pas complètement les lignes; enfin, parce qu'on reperd ce bénéfice, et au delà, par l'impression en feuilles : signaux spéciaux pour les mouvements du chariot, transcription des adresses pour les copies d'arrivée, répétition des télégrammes tronqués, etc. (voir p. 418).

» L'augmentation du nombre de révolutions des balais est *absolument illusoire* à tous les points de vue; en ce qui concerne le rendement de la ligne, le nombre de lettres $\frac{n}{5}$ qu'on peut transmettre dans un temps donné (voir p. 416) est aussi le produit du nombre de secteurs employés par le nombre de tours des balais : ainsi un quadruple anglo-américain, tournant à 250 tours par minute, est susceptible d'émettre $20 \times 250 = 5000$ signaux; or, sur la ligne Paris-Marseille, le sextuple à 30 contacts, à la vitesse de 180 tours, donne $30 \times 180 = 5400$ signaux; pour arriver à donner un chiffre égal, le Murray ou le Western devrait tourner à 270 tours par minute. Si le Siemens n'avait pas son rendement pratique limité par son système imprimeur, il tournerait à 1000 tours, comme l'avaient annoncé ses inventeurs, et enverrait sur la ligne 5000 émissions; il donnerait ainsi sensiblement le rendement intangible assigné à tous les systèmes de la même caté-

(1) Voir *Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones*, juin 1917, p. 248 et suiv.

gorie. En réalité, au point de vue de la ligne, l'augmentation de la vitesse n'a pas d'autre but que de compenser l'incomplète utilisation, déjà signalée, que donne le quadruple à 180 tours; et si les promoteurs de ces systèmes s'avisaient un jour de construire des sextuples, ils seraient dans l'obligation de les maintenir, comme le Baudot, aux environs de 200 tours; ou encore, si l'on plaçait des quadruples Western ou Murray sur des lignes dépassant la portée normale d'un sextuple Baudot, on serait amené à réduire proportionnellement la vitesse au fur et à mesure que ces lignes deviendraient plus longues.

» On peut donner d'ailleurs une preuve *actuelle* de cette affirmation : les relations Paris-Londres ont nécessité l'emploi au Baudot des câbles de Dieppe et du Havre; on a donc installé au Poste central de Paris, un triple Baudot *duplex*, à 17 contacts, par Dieppe, et, dans le bureau américain, un triple Western-Union, également duplex, à 15 contacts, par Le Havre. Or, le Baudot tourne à 180 tours par minute et le Western à ...155 ! Il serait sans doute injuste de tirer de là des conclusions trop défavorables au Western, mais on reconnaîtra, tout au moins, qu'à contingences égales, le Baudot soutient assez bien la comparaison.

» L'augmentation de la vitesse donne-t-elle un bénéfice au point de vue du rendement individuel des opérateurs ? Là encore, on peut répondre négativement; en effet, à 180 tours, l'agent réceptionnaire est alimenté de façon complète; peut-être, avec l'impression sur feuilles, pourrait-on pousser la vitesse jusqu'à 200 ou 210 tours, comme on le fait actuellement dans quelques agences de journaux; mais, au delà de cette limite, on tomberait dans l'inconvénient qui a marqué les expériences au Baudot-Dubreuil : lorsque le transmetteur débitait de 230 à 240 lettres par minute, l'agent préposé à la réception était débordé et l'on devait le faire aider; cette collaboration sur un même secteur ne va d'ailleurs pas sans inconvénient; quoi qu'il en soit, si un quadruple anglo-américain, comprenant normalement quatre opérateurs, se trouvait dans ces conditions de vitesse, on devrait compter, au bas mot, un agent supplémentaire pour aider les deux réceptionnaires; en ajoutant un dirigeur, nécessaire à cause du duplex (*voir* p. 432), on trouve au total, 6 agents; or, au sextuple Baudot, on doit compter 6 agents pour desservir les secteurs; un seul dirigeur s'occupant de deux sextuples, on arrive au total de 6,5 pour chaque installation. Enfin, si l'on tient compte que la réception sur feuille exige l'insertion des copies d'arrivée dans des enveloppes et la transcription des adresses (*voir* p. 418), il n'est pas exagéré d'estimer que la demi-

unité restante est largement absorbée par ce travail supplémentaire, et l'on voit que, finalement, le bénéfice de la vitesse est, là encore, un simple trompe-l'œil.

» Au point de vue du matériel, il n'est pas douteux que les appareils, tournant plus vite, s'usent dans la même proportion en ce qui concerne les axes; quant aux pièces qui travaillent par chocs, la puissance vive variant en raison du carré de la vitesse, il est permis de penser qu'elles s'usent proportionnellement plus vite; enfin, l'encombrement d'un quadruple ainsi exploité doit logiquement être le même que celui d'un sextuple Baudot, puisqu'il faut asseoir autour le même nombre d'agents. Ainsi donc, la vitesse plus grande usitée aux appareils anglo-américains *ne procure de bénéfice à aucun point de vue*, bien qu'elle puisse, *a priori*, faire croire à une supériorité réelle.

» L'obligation de travailler en duplex est également de nature à diminuer le rendement pratique, non seulement à cause des arrêts inévitables qu'il entraînerait sur de longues lignes aériennes, mais encore à cause de la *rigidité* signalée plus haut, et qui interdit de répartir les secteurs suivant les besoins (*voir* p. 421).

» **Particularités spéciales au Baudot.** — De ce qui précède, il résulte que les systèmes anglo-américains ne présentent aucun avantage tangible sur le Baudot muni de la transmission automatique. Par contre, les mille adaptations auxquelles le Baudot a pu se prêter, grâce à cette souplesse qui manque à ses concurrents, lui donnent sur ceux-ci une supériorité incontestable; la liste serait trop longue des divers modes d'échelonnement qui répondent chacun à des problèmes différents; mais il est un domaine dans lequel il a donné des résultats incomparables : c'est celui des *retransmetteurs*.

» Le retransmetteur n'est autre chose qu'un manipulateur automatique, pour la manœuvre duquel les doigts d'un opérateur sont remplacés par des armatures d'électro-aimant. Si, par exemple, sur la ligne Paris-Wien, trop longue pour être exploitée en direct, on place un poste translateur tel que Brégenz, celui-ci reçoit de Paris tout comme si les signaux lui étaient destinés, c'est-à-dire avec la rectification résultant de l'écourtement des contacts; les armatures des électro-aimants récepteurs sont agencées de telle sorte que chacune d'elles, lorsqu'elle est actionnée, abaisse une touche du manipulateur-retransmetteur relié à la ligne côté Wien; les signaux sont ainsi réexpédiés comme ils le seraient avec un relais ordinaire, mais avec cette différence essentielle, qu'ils sont

rectifiés; en effet, ces signaux, dans leur parcours Paris-Brégenz, ont subi des déformations plus ou moins importantes, suivant l'état de la ligne et les influences de voisinage; un relais ordinaire reproduirait fidèlement ces déformations, et comme d'autres viendraient s'y ajouter dans le parcours Brégenz-Wien, les signaux risqueraient de parvenir absolument méconnaissables à l'arrivée; avec les retransmetteurs, c'est, en réalité, une manipulation nouvelle qui a lieu à Brégenz, tout comme si elle était faite manuellement, à la façon des transits ordinaires, et les seules déformations à rectifier, à l'arrivée à Wien, sont celles qu'ont subies les signaux dans la dernière section de la ligne. Baudot avait, il est vrai, imaginé une translation rectificatrice donnant de bons résultats, mais la dernière solution est plus simple et d'une efficacité absolument exempte d'aléas.

Le poste intermédiaire peut, à chaque instant, contrôler la régularité des correspondances échangées et intervenir en temps utile, sans déranger en rien les postes extrêmes; si l'une des sections de la ligne se trouve interrompue, et en attendant qu'elle soit réparée ou remplacée, l'intermédiaire n'a qu'un commutateur à tourner pour prendre immédiatement la place de l'extrême défaillant, et recevoir de l'autre, en transit, le trafic qu'il achemine ensuite au mieux de ses possibilités : l'impraticabilité de l'une des sections n'entraîne donc pas l'immobilisation de l'autre, comme cela a lieu avec les autres systèmes.

» Des installations semblables ont permis de relier directement au Baudot, Londres avec Milan et même avec Rome; cette dernière communication (2000 km en chiffres ronds) comprend des retransmissions automatiques à Paris, Lyon et Turin, et fonctionne d'une façon parfaite; elle a rendu d'inappréciables services pendant la guerre; elle démontre que, théoriquement, *la portée des retransmetteurs est illimitée* puisque, dans chaque poste intermédiaire, les signaux arrivant déformés sont réexpédiés corrects et que, d'autre part, le temps de propagation n'entre en ligne de compte que pour chaque section prise en particulier, et ne se totalise pas pour l'ensemble de la ligne (*voir à cet égard le diagramme fig. 23*). Le jour où l'on sera assuré contre les interruptions des lignes, on réalisera, si on le veut, une communication Paris-Wladiwostock ou Paris-Saïgon, et c'est une éventualité à laquelle *aucun système au monde* ne peut actuellement prétendre.

» Les retransmetteurs permettent également d'utiliser des conducteurs existants, dont la capacité de rendement est incomplètement exploitée, pour constituer, *sans aucun frais de ligne*, des

communications nouvelles; par exemple, avec les fils Lyon-Montpellier et Montpellier-Toulouse, on a pu relier directement Lyon et Toulouse, tout en continuant les relations auxquelles ces

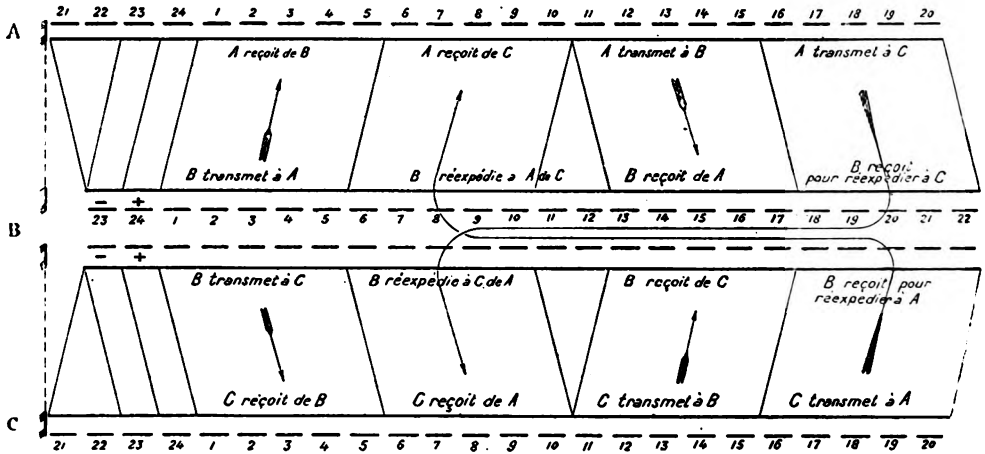


Fig. 23. — Diagramme de trois postes échelonnés, au Baudot quadruple, avec retransmetteurs automatiques.

fils étaient destinés, et réaliser ainsi une économie de près de 600 km de fil de ligne; la figure 23 donne le diagramme de l'installation, où l'on trouve, au total :

- 2 transmissions Lyon-Montpellier,
- 2 " Lyon-Toulouse,
- 2 " Montpellier-Toulouse.

» Enfin, dans le même ordre d'idées, on peut, avec les retransmetteurs, bifurquer sur deux directions différentes les transmissions effectuées sur une ligne, et faire entre quatre postes en combinaison; par exemple, Bordeaux communique normalement, par deux secteurs Baudot, avec Bayonne et avec Biarritz; il a suffi d'immobiliser un fil Paris-Bordeaux pour relier Paris à ces deux dernières villes, sans réduire en rien leurs moyens d'action avec Bordeaux; la figure 24 montre, schématiquement, la réalisation de cette remarquable combinaison, qui donne simultanément :

- 2 transmissions Paris-Bayonne,
- 2 " Paris-Biarritz,
- 2 " Bordeaux-Bayonne,
- 2 " Bordeaux-Biarritz.

» L'économie de conducteurs ainsi réalisée, déduction faite du fil commun Paris-Bordeaux, ressort à un peu plus de 1000 km.

» On pourrait multiplier les exemples de communications de ce genre, et c'est par milliers de kilomètres qu'on totaliserait les

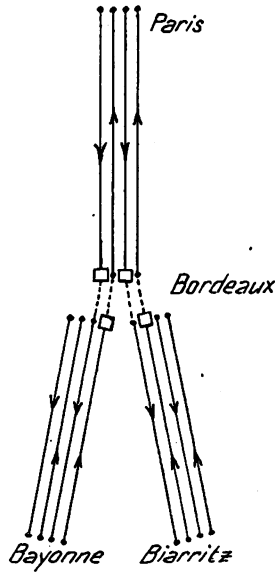


Fig. 24. — Schéma d'une ligne bifurquée, au Baudot quadruple, avec retransmetteurs automatiques.

économies de lignes ainsi réalisées; elles suffisent à montrer l'extraordinaire *souplesse* du système Baudot et à la mettre en parallèle avec la *rigidité* indiquée plus haut, de ceux qui ont été examinés comme concurrents possibles. Cet exemple montre avec quelle circonspection on doit envisager la suppression d'un système qui permet d'atteindre de tels résultats, ceux-ci n'ayant été obtenus, jusqu'ici, *nulle part ailleurs qu'en France*.

Récapitulation générale.

» **Systèmes automatiques.** — Les considérations développées plus haut (voir p. 413) ont fait ressortir les avantages de la transmission multiple sur la transmission automatique simple; il serait cependant injuste de rejeter en bloc les systèmes automatiques, dont certains, tout au moins, peuvent présenter des qualités réelles : il convient donc de les classer et de les examiner à tous les autres points de vue.

» On doit éliminer, tout d'abord, l'appareil Siemens, qui n'arrive guère à imprimer plus de la moitié des lettres que pourraient lui

fournir les lignes moyennes de 500 à 600 km ; cette infériorité s'atténuerait, il est vrai, au fur et à mesure qu'on augmenterait la distance, les autres systèmes étant obligés, eux aussi, de diminuer dans ce cas leur vitesse ; mais il perd, de ce fait, les qualités d'adaptation générale qu'on doit attendre d'un appareil de service courant.

» Le Buckingham-Barclay a été essayé en Angleterre et rejeté à cause de son rendement relativement faible et de divers autres inconvénients (1).

» Le Murray automatique a été abandonné par son inventeur même, qui lui préfère, avec raison, son système multiple ; celui-ci d'ailleurs, emploie la plupart des organes mécaniques et électriques de son devancier.

» Le Pollak-Virag (*voir* p. 391) donne un rendement de nature à compenser largement ses inconvénients d'automatique simple ; il nécessite, toutefois, la transcription des messages à l'arrivée, d'où une main-d'œuvre supplémentaire et une nouvelle source de retard ; mais c'est surtout à cause des influences fâcheuses qu'il exerce sur les circuits téléphoniques qu'il doit de n'avoir été adopté nulle part.

» Le Wheatstone et le Creed restent donc les seuls qui puissent prétendre, pour l'instant, à garder leur place dans l'outillage télégraphique ; tous deux sont très employés en Angleterre, mais seulement pour le service de la presse ; là, les nouvelles sont perforées au fur et à mesure de leur arrivée à l'agence, et transmises en bloc à une heure déterminée ; le *retard normal* disparaît donc complètement ; de plus, comme les rectifications, dans ce genre de transmission, sont extrêmement rares, on peut dire qu'il ne reste, au passif de ces deux systèmes, que leur code Morse, inférieur au code Baudot (*voir* p. 415). Le Creed a sur le Wheatstone l'avantage d'imprimer les messages ; il est robuste, bien construit et ne nécessite qu'un synchronisme approximatif.

» **Systèmes multiples.** — Dans cette catégorie, on doit écarter en premier lieu le Delany, qui utilise le code Morse avec transmission manuelle ordinaire et transcription à l'arrivée.

» Le Rowland, bien que basé sur un principe intéressant (*voir* p. 405), a été abandonné par la plupart des administrations qui l'avaient mis en service ; cela, non seulement à cause des inductions constatées sur les circuits empruntant les mêmes appuis, mais aussi

(1) *The Post Office Electrical Engineers Journal*, avril 1917, p. 5.

à cause de l'impossibilité d'alterner les transmissions simultanées : le duplex obligatoire, avec tous les aléas qu'il comporte sur les longues lignes, la *rigidité* qui en résulte au point de vue de l'exploitation, ont fait abandonner un système qui promettait plus qu'il n'a pu tenir.

» Le Dubreuil n'a pas d'autre prétention que celle d'augmenter le rendement individuel des opérateurs ; il y a parfaitement réussi, tout au moins en ce qui concerne la transmission ; des réserves sont à faire quant à la réception (*voir* p. 423) ; les essais, suspendus en 1904, ont été repris en 1914 et interrompus de nouveau par la guerre ; on doit donc, pour l'instant, réserver toute conclusion définitive.

» Il reste, maintenant, à établir un parallèle entre le Baudot, d'une part, et les systèmes Murray et Western, d'autre part ; si ces derniers, qui ne sont en réalité *que des Baudots*, présentent sur leur inspireur des avantages réellement tangibles, on doit les adopter sans restriction et supprimer, progressivement mais radicalement, le Baudot proprement dit : on ne verrait d'ailleurs pas pour quelle raison les nouveaux systèmes seraient réservés pour certains cas particuliers ; un principe fondamental de toute industrialisation, la *standardisation*, s'y oppose formellement. En effet, l'introduction d'un système d'utilisation occasionnelle n'entraînerait pas moins la nécessité de stocks d'appareils et de pièces de rechange, d'un outillage particulier pour les réparations, et aussi d'une instruction spéciale du personnel technique : dirigeants chargés de la mise en marche et du réglage des appareils, mécaniciens entraînés à la réparation, etc. ; dans les conditions d'exploitation qui sont celles de l'Administration française, et qui seront indiquées plus loin, il y a un intérêt capital à ne pas multiplier les types d'appareils ; bien au contraire doit-on songer à les restreindre, en supprimant le Hughes, par exemple, qui peut être facilement et avantageusement remplacé par le Baudot, dont on n'utiliserait qu'un seul secteur.

» Si, au contraire, les systèmes anglo-américains n'offrent que quelques avantages particuliers, au lieu de les prendre *avec leurs qualités et leurs défauts*, il est beaucoup plus judicieux de *perfectionner le Baudot* avec ce qu'ils peuvent avoir de bon et de laisser de côté ce qui est équivalent, médiocre ou *franchement mauvais*. On évitera ainsi un inutile bouleversement du matériel et de l'instruction technique du personnel.

» Examinons donc ce qui peut différencier entre eux les divers Baudots en présence.

» La transmission automatique, souhaitable à beaucoup de points de vue, va donner lieu à une expérience définitive et, il faut l'espérer, concluante (*voir* p. 418).

» L'impression sur feuille est sujette à controverses; le bénéfice de rendement qu'elle prétend procurer est absolument illusoire et elle présente, par ailleurs, quelques inconvénients (*voir* p. 418). Néanmoins, un concours pratique, organisé comme pour la transmission automatique, pourrait déterminer, une fois pour toutes, si les avantages qu'elle peut présenter compensent l'énorme complication des appareils qui réalisent ce mode d'impression.

» Ces points une fois acquis, on ne voit pas clairement en quoi les Baudots anglo-américains pourraient se prévaloir d'un rendement pratique supérieur à celui du Baudot français (*voir* p. 422), le rendement possible de la ligne étant régi exclusivement par les constantes électriques de celle-ci, le code étant le même, le mode de transmission étant identique, le rendement *théorique* est également identique; pour que le rendement *pratique* fût différent, il faudrait que les *méthodes d'exploitation française* fussent moins bonnes que celles des anglo-américains. Dans ce cas, c'est à la cause du mal qu'il conviendrait de s'attaquer, en réformant les méthodes ou l'organisation du service, mais on n'obtiendrait aucun résultat en changeant le matériel, car le dilemme suivant se pose : qu'on exploite les nouveaux appareils avec des méthodes reconnues mauvaises au Baudot, et ils ne donneront pas un mot de plus que le Baudot; qu'on applique au Baudot les méthodes anglo-américaines, si réellement elles sont meilleures, et l'on aura exactement le même rendement qu'avec les appareils anglo-américains.

» Ce serait sortir par trop du cadre, déjà étendu, de cette étude, que d'entreprendre la discussion des méthodes d'exploitation; un côté de cette question trouve cependant place ici, à cause de la grande complexité reprochée plus haut aux appareils anglo-américains, comparée à la robuste simplicité du Baudot français : c'est celui qui concerne la *spécialisation* du personnel. Cet autre principe fondamental de toute bonne exploitation industrielle est parfaitement réalisé dans les Compagnies américaines, où l'on trouve des opérateurs qui n'ont jamais fait que du Morse, par exemple, mais qui sont de véritables virtuoses dans leur spécialité. Peut-il en être de même dans l'Administration française ? Certes, dans une douzaine de grands centres télégraphiques, on trouve quelques agents réellement spécialisés, mais, pour le plus grand nombre, la légitime ambition de pouvoir prétendre, le moment venu, à des emplois d'avancement, est une invite pressante à passer par les

différents services et à s'*universaliser* au lieu de se *spécialiser*; dans les centres de moyenne et de petite importance, la spécialisation est radicalement impossible, car le même agent doit pouvoir assurer indifféremment le service au télégraphe, au téléphone, au guichet, au tri des lettres; il doit connaître et savoir appliquer au pied levé les innombrables taxes postales, télégraphiques et téléphoniques, les règlements de la Caisse d'Épargne et aussi les multiples opérations bancaires qu'on a rattachées aux services de l'Administration. La raison de cette universalité de connaissances, qu'on exige d'un agent français, est défendable, car, pour assurer l'ensemble du service avec le minimum de personnel, il est indispensable que les unités soient interchangeables, et il en sera ainsi tant qu'on ne se résignera pas à doubler ou à tripler les effectifs actuels.

» On conçoit que, dans ces conditions, il y a un intérêt capital à donner à un personnel aussi peu spécialisé, des appareils simples et robustes, ne demandant, de la part de ceux qui doivent les mettre au point, qu'un minimum de connaissances et surtout de pratique. Le Baudot répond parfaitement à cette conception; en est-il de même des appareils anglo-américains? Évidemment non. Le distributeur est inutilement compliqué par le duplex, et par la correction genre Picard, qui, avantageuse sur les câbles sous-marins, ne procure qu'un bénéfice contestable sur les lignes aériennes (*voir* p. 421); l'impression sur feuilles est obtenue au prix d'une autre complication (*voir* p. 420), et l'on conçoit que les dérangements, qui se produisent dans les appareils les mieux conçus et les mieux construits, ne peuvent, dans de telles conditions, être relevés avec la célérité convenable que par des agents parfaitement spécialisés; on les trouvera sans doute dans les grands centres, mais, pour les autres, on ne peut prévoir que tâtonnements, hésitations, et, finalement, mauvais service pratique.

» Dans les appareils Baudot, la vitesse est donnée par un régulateur à force centrifuge, qui ne permet pas de changer rapidement le régime; il y avait d'ailleurs intérêt, avec la transmission manuelle, à garder un rythme invariable, afin de ne pas gêner les opérateurs. Avec la transmission automatique, au contraire, l'entraînement par la roue phonique, employé par les anglo-américains, est avantageux, en ce qu'il permet de mieux harmoniser la vitesse de transmission avec l'état momentané de la ligne; les limites pratiques de ces variations ont été indiquées en leur temps (*voir* p. 423). Or, la roue phonique, inventée il y a près de 50 ans, a été adaptée, dès 1885, au multiple Delany : c'est assez

dire qu'elle est dans le domaine public; on peut, si l'on veut, pousser le scrupule jusqu'à l'acheter à l'un des constructeurs anglo-américains; on y trouvera, dans tous les cas, avec la transmission automatique, un bénéfice qui, bien qu'accessoire, est intéressant.

» Le duplex obligatoire, qui caractérise les systèmes anglo-américains, est certainement le point qui les met le plus nettement *en état d'infériorité vis-à-vis du Baudot*, tout au moins pour ce qui concerne le réseau aérien français; ce serait courir à un échec certain que de le généraliser dans de telles conditions. Lors d'expériences récentes effectuées avec l'appareil Creed, sur la ligne Bordeaux-Marseille (680 km), sur toute la durée d'un mois, le duplex n'a guère fonctionné de façon satisfaisante que pendant la moitié du temps; et encore, les ingénieurs anglais qui, à chaque extrémité, surveillaient l'installation, devaient-ils *réviser la balance deux ou trois fois par heure*; obtiendrait-on cela en service courant? Il est permis d'en douter, ou bien il faudrait affecter un dirigeur à chaque installation, fût-elle un double, alors que, dans les conditions actuelles, le même dirigeur surveille 10 secteurs, soit deux quadruples et un double. Le Creed possède l'avantage de pouvoir fonctionner en simplex; aussi, les jours où le duplex n'était pas praticable, faisait-on un très bon service avec seulement un rendement plus réduit. Il en irait tout autrement pour les systèmes anglo-américains qui *ne peuvent pas vivre sans le duplex*, et, dans les cas mentionnés ci-dessus, ce sont des interruptions totales qu'on aurait eues à enregistrer. Cet exemple n'est pas destiné à inscrire un grief au passif du système Creed, bien au contraire, puisqu'il s'en est tiré à son honneur, tandis que d'autres, à cause de leur *rigidité*, dont il a été plusieurs fois question ici, n'eussent pas triomphé des mêmes circonstances.

» Cette rigidité a été mise en regard de la souplesse du Baudot, tant en ce qui concerne l'affectation des secteurs que pour ce qui se rapporte à l'application des retransmetteurs (*voir p. 421 et suiv.*).

Conclusion.

» Ce qui précède laisse assez deviner la conclusion : le Baudot, muni de la transmission automatique et, accessoirement, de l'entraînement par roue phonique, gardera la première place qu'il a occupée jusqu'à ce jour, grâce à son fonctionnement irréprochable, à la robustesse et à la simplicité de tous ses organes, qui

permettent de le confier aux mains les moins spécialisées; grâce aussi à l'incomparable souplesse avec laquelle il s'adapte à tous les besoins, à toutes les circonstances; il sera exploité en duplex, si besoin est, sur toutes les lignes où ses concurrents pourraient l'être. Il conservera la première place aussi longtemps qu'un système basé sur un *principe nouveau* ne viendra pas la lui disputer; ce principe sera-t-il celui du Rowland, dont l'utilisation première semble avoir été incomplète; ou bien celui du Pollak-Virag, dont l'extraordinaire rapidité est malheureusement compensée par des défauts capitaux? Il serait sans doute téméraire de formuler un pronostic à cet égard, car un troisième peut surgir, d'un moment à l'autre, qui renversera complètement notre conception actuelle de la télégraphie rapide. Ce jour-là, le Baudot devra céder le pas au nouveau venu, comme il a supplanté lui-même ses devanciers, et notre amour-propre national n'en souffrira nullement, puisque le Baudot aura tenu une place glorieuse dans les annales de la télégraphie. L'importance de cette place est attestée par les efforts des inventeurs, dont il serait injuste de contester les mérites, mais qui, dans l'impossibilité de découvrir ce principe à la fois nouveau et meilleur, ne trouvent pas d'autre emploi à leur ingéniosité que dans les modifications, parfois heureuses, parfois médiocres, parfois inopportunes, qu'ils apportent au Baudot: c'est là, certes, le plus pur hommage qu'aurait pu désirer le génial inventeur français.

» On reconnaîtra sans doute que l'auteur de cette étude, pour rester tout à fait impartial, a banni systématiquement toute considération d'ordre sentimental; les mots *industrie nationale*, qui ont cependant leur valeur, n'ont pas été prononcés une seule fois, et c'est uniquement dans le domaine technique et expérimental que s'est poursuivie la discussion. La conclusion n'en acquiert que plus de force, et si, dans l'éventualité de son adoption par l'Administration, elle apporte une petite déconvenue purement commerciale à nos amis anglais et américains, ceux-ci sont trop fins techniciens pour s'en étonner.»

M. le Président remercie M. Montoriol de son intéressante Communication.

La séance est levée à 22 h 55 m.



RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Détermination des phases d'après lectures du wattmètre,

par G. KAPP (*Inst. Elect. Eng.*, avril 1917).

Il s'agit d'une méthode pour déterminer l'ordre de succession des phases et pour reconnaître si le courant avance ou retarde, dans un système triphasé. Si un wattmètre est relié à la phase A et que sa bobine de shunt étant reliée entre A et B on obtienne une lecture P_b , et que reliée entre A et C on obtienne une lecture P_c ; enfin si P'_b et P'_c sont les lectures correspondantes, alors qu'un condensateur est intercalé dans le circuit shunt du wattmètre, l'ordre de succession des phases et le fait de l'avance ou du retard du courant peuvent être déterminés d'après le Tableau suivant :

	Les lectures prises de la manière usuelle donnent			
	$P_c > P_b$		$P_b > P_c$	
Si les lectures prises avec le condensateur donnent.....	$P_b > P'_b$	$P'_b > P_b$	$P'_c > P_c$	$P_c > P'_c$
C'est que l'ordre des phases est... .	A — B — C	C — B — A	A — B — C	C — B — A
Et le courant.....	retarde	avance	avance	retarde

Dans l'emploi de ce Tableau, il faut avoir soin d'introduire les puissances avec leur signe propre; si par exemple P_b est numériquement plus petite que P'_b , mais que cette dernière soit négative tandis que P_b est positive, il faut alors considérer P'_b comme plus petite que P_b . Pour une fréquence de 50 périodes, le condensateur doit avoir une valeur d'environ $\frac{1200}{R}$ microfarads, R étant la résistance du circuit shunt du wattmètre, en ohms.

Le moteur d'induction triphasé alimenté par des tensions dissymétriques,

par C. DELLA SALDA (*Elettrotecnica*, juin 1917).

Cet article est relatif à l'application, aux moteurs d'induction triphasés, du principe général établi par Gilman et Fortescue, et exposé dans les *Proceedings of the Amer. Inst. Elect. Eng.* de 1916, principe d'après lequel « un système polyphasé dissymétrique peut être considéré comme la résultante de deux systèmes polyphasés symétriques tournant en sens contraires ». L'auteur démontre ce principe pour le cas particulier des moteurs triphasés, en recourant à la méthode graphique des vecteurs, laquelle fournit les intensités et les phases des courants ainsi que les voltages des deux systèmes composants, et ce dans le cas où les bobinages de stator sont reliés en triangle, comme dans celui où ils sont reliés en étoile. Conclusion : quoique le moteur d'induction triphasé tende à équilibrer les charges des trois phases, il est tout à fait et fortement sensible aux dissymétries de voltage. Le cas limite du moteur triphasé alimenté par un courant alternatif simple est également examiné et l'auteur montre que cette condition pêche aux points de vue du rendement, de l'échauffement, etc.

La pratique actuellement en usage dans le calcul et la fabrication des isolateurs à haute tension, par A.-O. AUSTIN (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juin 1917).

La production d'un bon isolateur ne constitue par un mince problème, surtout lorsqu'elle est subordonnée à un prix de revient relativement bas. Le calcul d'un tel isolateur nécessite une connaissance très approfondie des conditions de fabrication, car on ne doit pas oublier que telle partie de l'isolateur subit ordinairement de 20 à 30 opérations et passe dans plus d'une vingtaine de mains. Pour obtenir les meilleurs résultats, il a fallu supprimer la grosse main-d'œuvre partout où cela était possible, en perfectionnant l'outillage. C'est ainsi qu'on a maintenant recours à divers types de transporteurs à grand débit, pour les moules, le séchage, etc. Certain type de voiture, portant jusqu'à 700 isolateurs à suspension, permet de mener le traitement dans les meilleures conditions, avec le minimum de main-d'œuvre.

L'auteur discute les deux facteurs qui entrent dans la dépréciation des isolateurs en service : les craquelures et l'absorption. Une courbe représentant la caractéristique de *dépréciation*, pour plusieurs isolateurs, indique un faible taux de dépréciation pendant les six premières années de service, puis une augmentation rapide de ce taux, due aux craquelures, de sorte que l'on constate de 1 à 7 pour 100 d'isolateurs dépréciés pendant les deux années suivantes, de 7 à 17 pour 100 l'année d'après, et ainsi de suite. En éliminant le matériel défectueux tous les quatre ans, les risques inhérents au service diminuent fortement, si bien que dans la neuvième année on peut compter seulement un ou deux dérangements pour un lot de 10 000 isolateurs. Toutefois, les craquelures provoqueraient, pendant la dixième année, jusqu'à 14 dérangements, pour un lot semblable.

Les isolateurs ne paraissent nullement affectés au moment même de la craquelure, de sorte qu'il est impossible de prévenir leur défaillance au moyen de quelque essai électrique pratique. Il semble que la craquelure soit due à un grand effort plutôt qu'à la fatigue. Quant aux isolateurs poreux, ils peuvent être décelés par un essai électrique, et éliminés avant de perdre toute valeur.

Ce sont les isolateurs les plus gros et en apparence les plus robustes qui craquent le plus vite. On a constaté d'autre part que la dimension des joints en ciment, leur forme, leur nombre et peut-être plus encore leur élasticité, influent sur les craquelures. Ces divers motifs font que l'on tend aujourd'hui à réunir, dans les isolateurs du type à vis, les principales conditions suivantes : un petit nombre de parties fortes; des têtes petites avec joints de grosseur et de surface en rapport; enfin de l'élasticité dans les joints. Les mesures à prendre contre la craquelure des isolateurs à suspension sont également discutées.

En dernier lieu, l'auteur traite brièvement la question des essais après fabrication; il montre qu'un essai effectué à la fréquence normale, et de manière à obtenir un craquement intense sans qu'il y ait formation d'arc, est celui qui détermine le maximum d'effort sur toutes les zones, humides ou sèches de l'isolateur, et qui, par conséquent, assure le mieux l'élimination des pièces susceptibles de devenir fautives en ligne.

Caractéristiques d'isolement des câbles à haute tension, par W.-S. CLARK et G.-B. SHANKLIN (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juin 1917).

Ce Mémoire discute en détail toute une série d'essais effectués sur des câbles à un et à trois conducteurs, isolés au papier, au cambrie vernis, ou au caoutchouc. Pour les câbles

isolés au papier, l'huile d'imprégnation constitue le facteur important, le papier n'agissant qu'à titre d'espacement. Les compounds à base minérale hydrocarbonnée semblent préférables aux composés à base végétale. En dressant les *courbes cycliques de chaleur* on reconnut, notamment pour les câbles isolés au caoutchouc et pour ceux isolés au papier, que les courbes de refroidissement sont situées au-dessus des courbes d'échauffement, l'écart minimum se trouvant à la limite supérieure des courbes. Les auteurs considèrent que cet effet est dû, non pas à l'humidité, comme on l'a suggéré (théorie d'Evershed), mais à l'ionisation des gaz provenant de la volatilisation du compound et qui remplissent les menus espaces vides formés dans l'isolant par suite des flexions infligées à l'échantillon de câble lors de la préparation des essais, le câble étant froid. L'ionisation a lieu quand le voltage atteint une valeur suffisamment élevée, mais elle diminue lorsque la température augmente du fait de l'augmentation de pression des gaz, laquelle se produit au fur et à mesure que l'isolant se dilate et comble les espaces vides. En disséquant l'un des câbles, on trouva l'isolant percé, probablement sous l'action des gaz ionisés agissant à la manière d'un conducteur métallique. Les mesures de la résistivité effective, pour les divers isolants, montrent que sa diminution avec l'augmentation de la température est surtout accentuée pour le papier (notamment s'il n'est pas de première qualité), et que la moins accentuée est celle relative au caoutchouc; mais vu ses changements physiques, ce dernier ne peut être employé à une haute température. Le cambrie vernis, s'il est supérieur au papier, ne vaut pas à beaucoup près le caoutchouc, mais il est stable et uniforme, enfin il possède de précieuses propriétés mécaniques.

Influence des pertes diélectriques sur le régime des câbles souterrains à haute tension,
par A.-F. BANG et H.-C. LOUIS (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juin 1917).

Les auteurs ont procédé à divers essais sur une canalisation d'environ 15 m de longueur, construite pour les besoins de la cause, d'après les données de la canalisation de Sharp Street Station, à Baltimore, système caractérisé en ce qu'il assure des conditions de température sensiblement constantes, grâce à l'épaisse couche de sable qui environne les conduits de toutes parts.

Cette canalisation comprenait 7 câbles, dont 6 câbles d'intensité (ou câbles de chauffage) étaient reliés en série, et le septième câble, ou câble en essai, était relié à une source d'intensité et de voltage triphasés. Chaque câble reposait dans un conduit en terre cuite.

Quatre spécimens de câbles furent examinés, et l'on reconnut, notamment, que le compound imprégné a le plus grand effet sur la tenue d'un câble, l'huile minérale étant de beaucoup supérieure à l'huile végétale.

Étant donné que l'effet des pertes diélectriques sur l'échauffement d'un câble est cumulatif (car les pertes croissent avec l'élévation de la température), un certain point critique est atteint lorsqu'il y a plus de chaleur engendrée qu'il ne peut s'en dissiper, d'où brûlure. Cette température critique est aisément calculable si l'on connaît à la fois la perte en watts par mètre, la température du sol et la courbe de dissipation de chaleur propre au conduit. D'après les courbes représentées, il est évident que les pertes diélectriques sont susceptibles de restreindre fortement les régimes des câbles, surtout par temps chaud. De plus, il y a nécessité d'adopter des régimes différents pour des câbles de fabrication différente, ce qui ressort de la comparaison des quatre spécimens des câbles A, B, C, D, dont les trois pre-

miers sont imprégnés d'huile à base de résine, et le dernier, D, est imprégné d'huile minérale. Tous ces câbles sont à trois conducteurs de 80 mm², isolés au papier; l'épaisseur de l'isolant est, pour A et C, de 4,7 mm, et pour B et D de 6,3 mm. Les charges admissibles pour une température du sol de 21° C. sont :

	Ampères.	Kilowatts-heure par jour.
A.....	38	21 000
B.....	65	36 000
C.....	72	40 000
D.....	127	71 000

Les auteurs suggèrent donc que l'achat des câbles à haute tension s'opère toujours sous certaines garanties concernant les pertes diélectriques aux diverses températures; et que pour déterminer la capacité normale de charge de telle ligne à haute tension placée en conduite, la température critique soit elle-même déterminée expérimentalement et le régime établi de telle sorte que la température la plus élevée du cuivre demeure toujours inférieure, à ce point critique, d'un nombre défini de degrés (soit 10° C.). Si la température critique se trouvait être assez élevée pour que des températures inférieures puissent causer la destruction de l'isolant, le régime devrait être basé sur les températures admissibles pour les câbles à basse tension.

Lignes aériennes de transport d'énergie à haute tension, par G.-V. Twiss (*Inst. Elect. Eng.*, juin 1917).

Tout d'abord, l'auteur entre dans des considérations mécaniques et électriques relatives à la disposition des conducteurs entre eux et par rapport aux poteaux. Puis il expose des méthodes pour le calcul des flèches, des portées, de la tension et de la charge des conducteurs, avec courbes afférentes aux pratiques anglaise et américaine. Les Chapitres suivants traitent des fils de terre et de paratonnerre; des charges aux extrémités des lignes, aux angles et aux positions intermédiaires; du choix d'un type d'isolateur aux points de vue des charges mécaniques et des voltages; enfin des dispositions spéciales à employer avec le système répartiteur de phases Merz-Hunter. La question du matériel (bois, tubes ou treillis d'acier) à utiliser pour les poteaux est ensuite traitée, et presque tout le reste du Mémoire est consacré au calcul et à l'essai des isolateurs de lignes. Un nombre considérable d'exemples sont fournis et discutés. Ce Mémoire forme dans son ensemble un traité compact de la technique générale du sujet et de ses aspects mécaniques. Sa lecture fut suivie d'une longue discussion.

Illumination de l'Exposition du Panama-Pacifique, par W. d'A. Ryan (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juin 1917).

L'auteur, qui dirigea en chef les illuminations de l'Exposition internationale du Panama-Pacifique à San Francisco, décrit le système d'éclairage adopté pour cette Exposition où, de l'avis général, s'inaugura une ère nouvelle dans l'art de l'illumination. Du strict point de vue de l'ingénieur, ce système eût été considéré comme inefficace, mais le but pour-

suivi était précisément de supprimer les éclairages à grand éclat de surface et de s'attacher surtout à faire parfaitement valoir les beautés architecturales, en les baignant dans une harmonie de couleurs. Maints effets magnifiques furent ainsi réalisés, grâce aux diverses installations décrites, lesquelles présentent pour la plupart une réelle originalité. Les nombreuses et remarquables planches en couleur, annexées au Mémoire, donnent une idée fort nette de quelques-uns des effets obtenus.

Ligne artificielle de transport d'énergie, par G.-H. GRAY
(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, septembre 1917).

Afin d'étudier les caractéristiques d'une ligne de transport triphasée de la *Telluride Power Co*, ainsi que l'effet des relais de sectionnement, une ligne artificielle, doublant l'ensemble du système de transport, fut construite. Cette ligne artificielle était formée d'éléments représentant chacun 15 km de ligne réelle et constitués par des bobines d'induction raccordées électromagnétiquement pour figurer les effets inductifs, et par des condensateurs reliés entre les bobines et entre chacune des bobines et la terre. Il est montré que la ligne artificielle reproduit à très peu près les résultats obtenus en pratique sur la véritable ligne. Pour actionner les relais placés sur le circuit, on appliqua le principe des deux wattmètres. Les essais prouvèrent qu'en cas de courts circuits les relais n'actionnaient pas toujours les interrupteurs voulus, si la surcharge était une surcharge monophasée. Un certain nombre d'essais furent effectués avec divers courts circuits et avec différentes parties de la ligne artificielle mises à la terre. Le Mémoire renferme une série d'oscillogrammes exécutés sous diverses conditions et en différentes sections de la ligne.

Chute de tension dans les lignes aériennes triphasées,
par G. N. WRIGHT (*Inst. Elect. Eng.*, juillet 1917).

Des courbes dressées par l'auteur permettent de lire directement la chute de tension, pour n'importe quel facteur de puissance, dans une ligne aérienne triphasée à 3000 volts, 40 périodes, de 3 km de longueur, avec conducteurs disposés symétriquement et pour divers écartements et diverses sections des conducteurs. Les courbes s'appliquent à une densité de courant de 40 ampères par millimètre carré, mais la chute de voltage, pour toute autre densité, peut être obtenue par simple proportion. La chute, pour d'autres voltages ou d'autres longueurs de ligne, s'obtient également par simple proportion.

Étude mathématique de la force magnétomotrice des bobinages d'induit,
par B. HAGUE (*Inst. Elect. Eng.*, juillet 1917).

Des formules relatives aux amplitudes et aux vitesses des composantes de champs lissants ou tournants, dans les enroulements d'induits polyphasés, sont tirées, d'emblée, de la série de Fourier qui représente la distribution de la force magnétomotrice due à un enroulement simple. Les formules sont réduites à leur plus simple expression dans les cas qui se rencontrent le plus ordinairement en pratique, c'est-à-dire les systèmes polyphasés symétriques et semi-symétriques, avec enroulements à simple couche, et avec enroulements

à double couche fermés et ouverts. Les enroulements uniformément distribués et les enroulements à rainures sont examinés tour à tour. Chaque cas est caractérisé par la suppression de certains champs composants spéciaux et par la prédominance d'autres champs. L'effet de l'emploi de bobines à pas raccourci est traité, en considérant et en déterminant la différence entre le champ produit par un enroulement à pas raccourci et celui produit par l'enroulement à pas total correspondant. De l'emploi de tels enroulements peut résulter l'introduction d'une série de champs entièrement nouvelle; ainsi, avec des systèmes symétriques et avec un nombre impair de phases, des harmoniques pairs peuvent être introduits dans la série de Fourier, tandis qu'avec des systèmes polyphasés semi-symétriques, des champs pulsatoires fixes peuvent être ajoutés aux champs tournants usuels. En dernier lieu, le Mémoire traite des forces magnétomotrices dues aux harmoniques, dans les courants polyphasés.

Méthode pour mesurer la puissance des circuits triphasés quand $\cos \varphi$ est voisin de zéro, par E. BIFFI (*Elettrotecnica*, 25 août 1917).

Précédemment et dans la même Revue, l'auteur décrit deux méthodes exactes pour la mesure de la puissance des circuits à courant alternatif simple quand $\cos \varphi$ est voisin de zéro. Dans le présent article, l'auteur expose une méthode propre à mesurer la puissance dans les circuits triphasés où existe la même condition. A cet effet, il emploie un wattmètre triphasé formé de deux wattmètres ordinaires dont les bobines mobiles sont montées sur le même arbre. Lorsque $\cos \varphi$ est inférieur à 0,5, c'est-à-dire très faible, l'un des wattmètres élémentaires tend à donner une déviation positive, tandis que l'autre tend à donner une déviation négative. En augmentant donc la résistance en série avec la bobine de tension du wattmètre qui tend à donner la déviation la plus grande, on peut réduire à zéro la déviation du wattmètre triphasé. Quand cette condition a été obtenue, on renverse le courant dans la bobine mobile du wattmètre qui donne la déviation négative; le wattmètre triphasé indique alors une certaine puissance A , et la lecture s'effectuera sous de bonnes conditions, car l'aiguille se trouvera vers le milieu de l'échelle. L'auteur démontre que la puissance absorbée par le circuit triphasé a pour expression

$$P = \frac{rA}{2R},$$

R étant la résistance de chacune des bobines de tension et r la résistance additionnelle nécessaire pour ramener la déviation à zéro. Au lieu d'un wattmètre triphasé, on peut employer un double électrodynamomètre et un wattmètre ordinaire, le premier de ces appareils permettant d'obtenir la déviation zéro et le second servant à mesurer la puissance. L'auteur prend en considération les erreurs de phase dues, à la fois, à l'inductance des bobines mobiles et aux transformateurs d'intensité.

L'application de la méthode à un wattmètre enregistreur triphasé est également considérée. En ce cas, l'électrodynamomètre est employé comme relais à double contact pour commander le mouvement d'un petit moteur agissant sur la résistance variable.

BIBLIOGRAPHIE.

Théorie des enroulements des machines à courant continu, par G. SZARVADY; 1 vol. in-8 de 137 pages, avec 36 figures et diagrammes. Paris, H. Dunod et E. Pinat; 1918.

C'est en partant de la formule bien connue, établie par Arnold en 1891, que l'auteur a développé cette théorie des enroulements. Inutile de dire que le sujet est ici traité de main de maître....

Arnold qui, grâce à sa formule, put créer les enroulements en *séries parallèles*, n'a pas vu, semble-t-il, que cette formule permettait aussi de prédéterminer, d'une part *les emplacements des balais sur le collecteur*, d'autre part *le nombre, la répartition et les numéros d'ordre des sections en court circuit*, et cela sans qu'il soit nécessaire de recourir à l'emploi souvent fastidieux des tableaux et schémas usuels. Or, l'auteur montre que « pour représenter ce qu'il importe de connaître dans un enroulement, c'est-à-dire précisément les emplacements des balais et les sections en court circuit, il suffit de diagrammes extrêmement simples, possédant la propriété d'être indépendants du nombre des éléments de l'enroulement, de sorte que *le même tracé s'adapte à toutes les machines ayant même nombre de pôles et même nombre de circuits quel que soit le nombre des lames du collecteur* ».

Après cet aperçu de la méthode de représentation, aussi originale que judicieuse, pratiquée par l'auteur, il convient d'énumérer tout au moins les principales divisions de l'Ouvrage :

I. Formule des enroulements à pas normal. — II. Emplacements des balais. — III. Sections en court circuit. — IV. Enroulements les plus usuels. — V. Problème inverse. — VI. Tableaux généraux des balais. — VII. Diagrammes généraux des sections en court circuit. — VIII. Enroulements multiples. — IX. Enroulements à pas réduit. — X. Enroulements des tambours et des disques. — XI. Conclusions.

Un exemple frappant des avantages de la méthode de représentation adoptée dans le présent Ouvrage, sur celle d'Arnold, est donné à la fin du dernier Chapitre; c'est l'application de la méthode à une machine à 36 pôles, comportant près de 3000 lames de collecteur, telle que celle construite par la « General Electric Company » et citée par Sylvanus Thompson dans son *Traité des machines à courant continu* (7^e édition anglaise). Alors que pour une semblable dynamo, l'emploi des procédés usuels serait pour ainsi dire prohibitif, la nouvelle méthode conduit aux résultats cherchés moyennant des tableaux et des diagrammes relativement très simples.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS.

(Suite.)

- Académie des Sciences. Annuaire pour 1919.* Paris, Gauthier-Villars et C^{ie}. 1919; 1 vol. in-16, broché. (*Don des éditeurs.*)
- Annuaire pour l'an 1919 publié par le Bureau des Longitudes.* Avec des Notices scientifiques. Paris, Gauthier-Villars et C^{ie}, 1919; 1 vol. in-16, broché. (*Don des éditeurs.*)
- Applications (Les) de la Physique pendant la guerre*, par H. VIGNERON. Paris, Masson et C^{ie}, 1919; 1 vol. in-8°, broché. (*Don des éditeurs.*)
- Cours de Physique générale*, par H. OLLIVIER. Tome III. Paris, A. Hermann et fils, 1919; 1 vol. in-8°, broché. (*Don des éditeurs.*)
- Dictionnaire des termes techniques de télégraphie-téléphonie français-anglais et anglais-français*, par L. TISSOT-DUPONT. Paris, Dunod et Pinat, 1919; 1 vol. in-16, cartonné. (*Don des éditeurs.*)
- Énergie (L') créatrice et la pensée humaine*, par le capitaine Stéphan CHRISTESCO. Paris, typ. Grow-Radenez, 1919; 1 vol. in-16, broché. (*Don des éditeurs.*)
- Essai sur la génération de l'énergie*, par Maurice BLAIN. Constantine, imp. Pompeani et Carbonnel, 1919; 1 brochure in-8°. (*Don de l'auteur.*)
- Formulaire de l'électricien et du mécanicien*, par E. HOSPITALIER et G. ROUX. 29^e édition (1919). Paris, Masson et C^{ie}, 1919; 1 vol. in-8°, cartonné. (*Don des éditeurs.*)
- Schémas et règles pratiques de bobinage des machines électriques*, par F. TORICES et Adr. CURCHOD. Paris, Dunod et Pinat, 1919; 1 vol. in-8°, broché. (*Don des auteurs et des éditeurs.*)
- Sélénium (Le) et ses applications actuelles*, par Louis ANCEL. (Extrait de la revue *Chimie et Industrie*, numéro du 1^{er} mars 1919. Paris, Imprimerie de Vaugirard; 1 brochure in-4°. (*Don de l'auteur.*)
- Surchauffe (La) de la vapeur. Ses avantages.* 2^e édition (1914), par l'Institut scientifique et industriel. Paris, édition du *Mois scientifique et industriel*, 1919; 1 vol. grand in-8°, broché. (*Don de l'éditeur.*)
- Théorie (La) électrique moderne. Théorie électronique*, par Norman-Robert CAMPBELL, Sc. D. de l'Université de Leeds. Ouvrage traduit sur la 2^e édition anglaise, par A. CORVISTY. Édition corrigée et augmentée par l'auteur. Paris, Hermann et fils, 1919; 1 vol. in-8°, broché. (*Don des éditeurs.*)

Tube (Le) Coolidge. Ses applications scientifiques, médicales et industrielles, par H. PILON. Paris, Masson et C^{ie}, 1919; 1 vol. in-8°, broché. (*Don des éditeurs.*)

Unités électriques, par G. SZARVADY. Paris, Dunod et Pinat, 1919; 1 vol. in-8°, broché. (*Don des éditeurs.*)

IL Y A TRENTE ANS.

Juin 1889. — Discussion sur les machines dynamos Rechniewski, par MM. R. ARNOUX, PICOU, W.-C. RECHNIEWSKI. — La phonographie et la téléphonographie, par M. E. MERCADIER. — Sur la remise à l'heure des horloges à grande distance par l'intermédiaire des fils télégraphiques, par MM. DUMONT et LEPAUTE.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.

SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS



LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)
PARIS 30 FR. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 32¹FR.
Prix du numéro : 3 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de poste

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS,
LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits.

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine) et à LYON.

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

Pour la *Commande de :*

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la *Propulsion des Navires.*

Puissance totale des turbines

installées en France

par la *Compagnie Electro-Mécanique*
et ses Licenciés.

plus de 1.200.000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Stations Centrales.

Transports de Force.

Traction électrique par courant
continu et par courant alternatif.

Éclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminaires.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

ACCUMULATEURS ELECTRIQUES

FULMEN

Bureaux et Usine : à CLICHY, 18, Quai de Clichy.

FILS ET CABLES

POUR L'ÉLECTRICITÉ

R. ALLIOT & ROL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

38, rue de Reuilly, 38

PARIS

TELEPHONE

CABLERIE DE JEUMONT

TUBES

ISOLATEURS

ISOLANTS MOULÉS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du mercredi 2 juillet 1919 : Admission de Membres titulaires, p. 443. — Dons au Laboratoire central et à l'École supérieure d'Électricité, p. 444. — Membres décédés, p. 444. — Échange de télégrammes avec la British Institution of Electrical Engineers, p. 446. — Notes et Remarques sur les câbles électriques à haute tension (M. **Lebaupin**), p. 447. — Discussion : (M. **Grosselin**), p. 458. — (M. **Masson**), p. 462. — Amplificateurs divers (M. **M. Latour**), p. 465. — Remarques sur les caractéristiques d'alternateurs (M. **Doligez**), p. 485.

CORRESPONDANCE, p. 499.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 500.

BIBLIOGRAPHIE, p. 504.

IL Y A TRENTE ANS, p. 506.

ERRATA, p. 506.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 2 juillet 1919 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. GUILBERT, VICE-PRÉSIDENT.

La séance est ouverte à 20 h 45 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Darzens (Georges), Professeur de Chimie à l'École Polytechnique, 21, avenue Ledru-Rollin, à Paris. — Présenté par MM. Fery et Saget.

Doligez (Marcel-Auguste), Ingénieur civil des Mines, Mines de Sarre et Moselle, à Carling, Lorraine. — Présenté par MM. P. Janet et Jouvion.

Lorrain (André), Ingénieur à la Compagnie Thomson-Houston, 9, quai des Tennerolles, à Saint-Cloud (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Brune et Girault.

Pigné (Émile-Louis), Chef des stations électriques aux Mines de Lens, 99, rue Victor-Hugo, à Sotteville-les-Rouen (Seine-Inférieure). — Présenté par MM. Dinoire et P. Revel.

Scott-Taggart (John), Ingénieur en Radiotélégraphie « Eart Bank », Smithills-Bolton (Angleterre). — Présenté par MM. Mazen et L. Joly.

M. le PRÉSIDENT fait part à la Société des dons suivants :

De la Maison *V^{ve} Delafon* au Laboratoire central d'Électricité : frais de remise en état de cinq boîtes de 100 éléments C.O.

De M. *Podliaski* à l'École supérieure d'Électricité : une somme de 100 fr.

Il adresse à ces généreux donateurs les remerciements de la Société.

M. le PRÉSIDENT fait part à la Société du décès de MM. *Couteux, Maisonneuve, Vuilleumier et Gaucher* (Henri), ce dernier mort au champ d'honneur en entraînant ses hommes à l'assaut. Il adresse aux familles de ces collègues les condoléances de la Société.

M. le PRÉSIDENT. — « Messieurs, j'ai à remplir un triste devoir, celui de vous faire part de la mort d'un des membres les plus anciens et les plus connus de notre Société, M. *Armagnat* (Henri), décédé hier, dans sa 56^e année, après une courte maladie qui est venue le surprendre en plein travail.

» D'autres que moi, plus autorisés, rendront compte des magnifiques travaux accomplis par M. Armagnat pendant sa carrière.

» Son œuvre est considérable et en dehors de nombreuses études, publiées depuis plus de 30 ans dans diverses revues, il avait écrit deux Ouvrages remarquables, l'un sur la bobine d'induction et l'autre sur les mesures électriques. Ces travaux avaient été récompensés tardivement, en 1917, par l'Académie des Sciences qui attribua à M. Armagnat le prix Planté.

» Je voudrais surtout aujourd'hui, en adressant un hommage ému à sa mémoire, rappeler les services que M. Armagnat a rendus à la Société des Électriciens.

» Reçu membre de la Société en 1890, celle-ci l'appela dans son Comité dès 1900 et depuis cette époque il fit partie du Bureau et du Comité sans interruption.

» Secrétaire de 1900 à 1903, il devint secrétaire général en 1905 et dirigea, pendant 4 ans, le lourd service du Secrétariat, se dépensant sans compter.

» Élu vice-président en 1909 et chargé de la présidence de la sixième Section, celle des instruments de mesure, il contribua puissamment à développer les travaux de cette importante Section.

» De 1912 à 1918, il resta membre du Comité et il était encore en 1918-1919 membre de la Commission des Comptes.

» Il venait d'être réélu membre du Comité en avril dernier et participait encore aux travaux de la sixième Section dans sa réunion de juin où il nous entretenait de la question des appareils pour haute fréquence qu'il avait mise au point.

» Pendant la guerre, notre regretté collègue libéré de toute obligation militaire n'était pas resté inactif; il rendit à la Défense nationale d'importants services que M. le général Ferrié, avec sa haute autorité, reconnaît dans la Note suivante qu'il a bien voulu nous communiquer :

« M. Armagnat est venu s'offrir comme ingénieur bénévole à la Radiotélégraphie militaire, dès les premiers jours de la guerre.

» Il a pris aussitôt en main toutes les questions relatives aux mesures en haute fréquence et à la radiogoniométrie.

» Sa haute valeur scientifique et ses connaissances spéciales en ces matières lui permirent de réaliser d'énormes progrès et son service spécial prit peu à peu une importance considérable.

» Les méthodes et appareils nouveaux qu'il a imaginés furent d'une très grande utilité à nos armées et nos alliés les employèrent aussi pour la plupart.

» La mort l'a surpris en plein travail; il mettait au point des dispositifs nouveaux de radiogoniométrie sur avions.

» Son importante œuvre de guerre avait été reconnue par M. le Ministre de la Guerre qui lui décerna à plusieurs reprises des félicitations officielles et lui donna ensuite la Croix de la Légion d'honneur en janvier dernier. »

» En terminant, j'adresserai à Madame Armagnat et à ses enfants les respectueuses condoléances de la Société ainsi que toute la part que nous prenons à son immense douleur. »

M. le PRÉSIDENT communique à la Société le télégramme suivant :

Londres, 27 juin 1919.

Les Membres de l'Institution britannique des Ingénieurs électriciens adressent à leurs frères ingénieurs électriciens alliés dans la paix et dans la guerre, leurs fraternelles congratulations, à l'occasion de la première fête qu'ils célèbrent depuis l'ouverture des hostilités (1914).

WORDINGHAM, *Président*.

M. le Président a répondu en ces termes :

Paris, 1^{er} juillet 1919.

Institution britannique des Ingénieurs électriciens, à Londres (Angleterre).

Profondément touchés par la pensée affectueuse de leurs confrères de l'Institution britannique des Ingénieurs électriciens, les Membres de la Société française des Électriciens leur adressent leurs fraternelles salutations à l'occasion de leur première fête et se réjouissent avec eux de la signature de la paix.

Le Président, MAZEN.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

NOTES ET REMARQUES SUR LES CÂBLES ÉLECTRIQUES A HAUTE TENSION.

M. LEBAPIN. — « La mise en exploitation d'un réseau de câbles haute tension à 5000 volts et 15 000 volts, de près de 350 km, qui nécessite de nombreuses réceptions en usine, des travaux de pose de longue durée, puis des essais après pose en grande quantité, ne va pas, on le conçoit, sans quelques difficultés.

» Cette grande longueur de canalisations fournies par sept constructeurs français a permis de faire un certain nombre d'observations et de poser quelques problèmes dont nous parlerons au cours de cette Note. Nous diviserons celle-ci en trois parties : 1^o Fabrication et essais de réception en usine; 2^o Pose et essais après pose; 3^o Exploitation.

» 1. *Fabrication et essais en usine.* — En cours de fabrication nous avons pu constater les principaux défauts suivants :

» a. Coups reçus par les câbles pendant la manutention.

» Ces défauts sont, en général, visibles et se révèlent très facilement.

» b. Défauts produits par suite d'enroulements sur bobines et de dévidages trop nombreux.

» Ils sont assez souvent longs à apparaître et persistent quelquefois jusqu'à la pose.

» c. Pose défectueuse des différentes couches de papier.

» Ces défauts sont parfois assez longs à se manifester aux essais. Ils peuvent même passer inaperçus et subsister après les réceptions en usine et après pose. Un excellent moyen de se prémunir contre ces défauts est de faire des essais de pliage. Ceux-ci sont également très utiles pour se rendre compte de la qualité du papier employé et de la souplesse du câble.

» d. Réparations faites en cours de fabrication.

» Pour qu'elles ne soient pas dangereuses, il faut qu'elles soient exécutées avec le plus grand soin. Malgré cela il arrive qu'elles ne donnent aucune indication ni à l'essai d'isolement ni à l'essai à la tension, mais les défauts se déclarent en cours d'exploitation comme nous avons pu le constater. Toutefois l'emploi du courant continu permet, en général, de les déceler aux essais après pose.

» Nous aurons l'occasion d'en parler plus loin.

» e. Dépôts de poussières conductrices sur les couches de papier.

» Ces dépôts créent des défauts qu'il est très difficile de déceler. Les essais d'isolement donnant des résultats satisfaisants, les câbles

claquent sans qu'on en trouve la raison. Seul un examen très attentif permet de découvrir la nature du mal.

» f. Défectuosités à la mise sous plomb.

» Le défaut le plus souvent constaté provient de décentrages. Il subsiste parfois jusqu'en cours d'exploitation; mais le plus fréquemment il ne résiste pas aux essais effectués après pose.

» g. Défauts d'imprégnation.

» Il en résulte des points faibles qui échappent parfois à l'investigation, mais qui résistent rarement à l'application du courant continu.

» Après des essais sérieux de réception en usine, on est à peu près certain que tous les défauts ont été éliminés. Un cas cependant peut conduire à de graves ennuis, c'est lorsque les câbles ont un coefficient de sécurité insuffisant, c'est-à-dire lorsque la tension d'essai en usine est très peu éloignée de la tension de claquage. De tels câbles peuvent en effet subir avec succès les essais de réception, et à la suite des manipulations effectuées jusqu'à leur mise en place, devenir insuffisants.

» En réalité, bien qu'il n'existe pas de relation certaine entre la résistance d'isolement et la rigidité diélectrique, la résistance d'isolement de ces câbles est, en général, plus faible que celle des câbles fabriqués avec un coefficient de sécurité plus grand. Il peut cependant arriver qu'en prenant la résistance au bout de 3 minutes, comme on le fait fréquemment, on ne trouve pas des chiffres fort différents pour ces deux sortes de fabrication. Il faut donc, de toute nécessité, observer le phénomène d'électrification : dans le cas de câbles à plus faible coefficient de sécurité, pendant la durée de 3 minutes, la résistance d'isolement variera généralement dans de bien plus grandes limites.

» Mais ce n'est pas là un indice suffisant. Si l'on est conduit à envisager la détermination du coefficient de sécurité, il faudra opérer expérimentalement. En ce qui nous concerne, nous avons procédé en faisant des prélèvements de 5 m sur un certain nombre de bobines ayant déjà subi l'essai de tension imposée. La mise sous tension doit se faire en augmentant le voltage d'une manière continue, mais suffisamment lente pour éviter tout lancer de l'aiguille de l'électromètre.

» Dans l'état actuel de la fabrication des câbles haute tension en France, on peut certainement compter sur un coefficient de sécurité de 6. On le définira exactement en disant que tout échantillon de 5 m devra supporter pendant 5 minutes une tension alternative égale au moins à 6 fois la tension normale.

» Nous faisons remarquer que pour éviter toute discussion, et pour avoir une précision plus grande, il est nécessaire d'employer un électromètre pour les tensions d'essais élevées. En prenant toutes les précautions qu'exigent cet appareil, l'électromètre Abraham-Carpentier nous a donné complète satisfaction en alternatif comme en continu.

» Autrefois, quand les câbles avaient été réceptionnés avec beaucoup de soin, et c'est ce qui se passe en général, car il y va de l'intérêt du vendeur comme de l'acheteur, on avait la plus grande confiance dans les résultats que donnerait la canalisation après pose. On n'avait d'ailleurs la plupart du temps, aucun moyen de vérification, faute d'appareils convenables, et l'essai au double de la tension normale ne donnait généralement aucun résultat. Seul l'essai d'isolement fournissait une indication sur certains graves défauts; mais on n'était pas renseigné sur d'autres défauts qui avaient pu se produire, notamment pendant la pose.

» 2. *Pose et essais après pose.* — Les manutentions successives et les travaux de mise en place des canalisations souterraines peuvent, en effet, occasionner des défauts dans les câbles tels que coups, froissements, fissures, humidité, aggravation de points faibles non décelés à l'usine. Enfin les boîtes de jonction sont des causes fréquentes de défauts.

» Tous ces défauts résistant presque toujours à l'application du courant alternatif d'essai (deux fois la tension normale), des claquages se produisent brusquement après un temps plus ou moins long en cours d'exploitation, avec des conséquences souvent fâcheuses. La recherche d'un appareil permettant de faire l'essai des canalisations souterraines, après pose, dans des conditions vraiment satisfaisantes, était donc trop utile pour que son importance échappât à M. Mazen, notre président actuel, étant donnée l'extension sans cesse croissante du réseau de câble des chemins de fer de l'État.

» Dès 1910, nous nous intéressâmes aux premiers essais de MM. Delon et nous fûmes amenés à examiner et essayer successivement les appareils de MM. Delon (Berthoud-Borel), Picou (Geoffroy-Delore), Léauté (Société industrielle des Téléphones).

» Ces appareils sont suffisamment connus pour que nous nous dispensions de les décrire; les deux premiers sont à courant continu et le troisième à courant alternatif.

» Au commencement de l'année 1912 nous avions deux canalisations de 18 km de longueur chacune, dont il s'agissait de faire les

essais de réception après pose. L'utilisation des deux derniers appareils ci-dessus nommés ne put être envisagée, parce qu'il n'existait pas de modèle suffisant pour l'application d'une capacité aussi importante. Au contraire, l'essai du contact tournant de M. Delon, fait en avril de la même année, nous permit de constater que cet appareil était susceptible de donner satisfaction.

» Mais à la suite de ce premier essai, les câbles ci-dessus étant devenus, pour des raisons de service, indisponibles, les essais ne furent recommencés qu'au mois d'août. C'est vraiment à partir de cette époque que nous pûmes nous rendre compte de la façon dont se comportaient les canalisations souterraines sous tension continue. Il nous fut très vite facile de discerner, suivant la façon dont se révélaient les défauts, si l'on avait affaire à une défectuosité du câble lui-même ou à une mauvaise confection des boîtes de jonction ou d'extrémités.

» Dans le premier cas, les défauts se déclarent très souvent au bout d'un temps assez long, compris entre 10 et 14 minutes; la tension tombe à une valeur plus basse, s'y maintient quelques instants, puis retombe encore, jusqu'à ce que l'électromètre arrive à zéro. La valeur de la résistance d'isolement est alors le plus souvent comprise entre 20.000 et 200 000 ohms et la localisation du défaut est facile.

» Dans le cas où les boîtes sont en jeu, le défaut apparaît ordinairement très vite, mais le claquage, par contre, est long et difficile à obtenir. La tension se montre tout à coup un peu instable, puis baisse brusquement, pour remonter ensuite; et ce n'est qu'au bout d'un certain temps qu'elle retombe à une valeur plus faible que la première fois, pour remonter encore. Et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'électromètre indique une tension nulle. Parfois il est très difficile d'en arriver là, la valeur de la résistance d'isolement reste de l'ordre de 1 à 2 mégohms, et il faut de longues heures pour carboniser complètement le défaut.

» Nous pouvons dire, en résumé, que, dans tous les cas, le courant continu permet de déceler les défauts, puis de les détruire, de façon à pouvoir les localiser.

» Dès le début de l'emploi du courant continu pour l'essai des canalisations après pose, nous avons dû nous préoccuper de la tension qu'il y avait lieu d'adopter. Les expériences faites antérieurement au Laboratoire central d'Électricité ne nous permettaient pas de fixer notre choix.

» Les canalisations souterraines des chemins de fer de l'État devaient après pose, être essayées à une tension double de la tension

normale de 15 000 volts. Quel rapport fallait-il prendre entre la tension alternative de 30 000 volts, imposée au cahier des charges et la nouvelle tension continue? Les essais faits par la maison Berthoud-Borel et par nous-mêmes nous amenèrent à penser qu'on pouvait, sans inconvénients, prendre une valeur de 2,5 à 3 fois plus grande pour la tension continue. Cela nous conduisit à essayer nos câbles à 75 000 volts ou 90 000 volts. Nous choisîmes définitivement la tension de 75 000 volts qui fut d'ailleurs acceptée après quelques petites difficultés par tous les constructeurs français.

» Nous devons cependant ajouter que quelques câbles furent essayés, à l'origine, pour voir comment ils se comporteraient, à 90 000 et même 100 000 volts.

» Voici maintenant les constatations que nous avons pu faire au cours de nos essais :

» Des défauts de fabrication qui n'avaient pas été décelés en usine (papiers froissés ou mal posés, réparations, décentrages, défauts d'imprégnation) n'ont pu être révélés qu'à une valeur de la tension continue comprise entre 70 000 et 75 000 volts.

» Des défauts de boîtes qui se sont révélés assez vite ont permis cependant d'atteindre plus de 70 000 volts, avant de claquer, et il a fallu persévérer pour les brûler.

» Dans ces conditions, un coefficient inférieur à 2,5 qui eût conduit à une tension inférieure à 75 000 volts eût été certainement insuffisant. En outre, une fois que les défauts dont nous venons de parler eurent été enlevés, aucun autre défaut ne se produisit jusqu'à 75 000 volts et même, comme nous l'avons vu, jusqu'à 90 000 et même 100 000 volts. Enfin un certain nombre de défauts s'étant déclarés très brusquement, nous n'avons jamais pu constater qu'il en était résulté de nouveaux défauts dus à des oscillations de courant dangereuses.

» Nous pouvons donc dire que la fabrication des câbles haute tension résultant des conditions imposées par le cahier des charges conduit à l'adoption du coefficient 2,5. De plus, l'application du courant continu, depuis 7 ans, n'a jamais donné lieu à aucun ennui. Quant aux quelques claquages qui se sont produits en cours d'exploitation, on a pu en donner des explications satisfaisantes, les défauts provenant ordinairement d'accidents survenus aux câbles, depuis leur mise en place.

» Ces essais nous ont également permis de faire des comparaisons entre les différentes fabrications de câbles. L'examen en cours de construction et les résultats obtenus jusqu'à fin de pose, nous ont conduit à classer les matières d'imprégnation en trois catégories :

» 1^o Les matières plutôt dures;

- » 2^o Les matières très fluides;
- » 3^o Les matières de consistance moyenne (ni trop dure ni trop fluide).

» La première catégorie a l'inconvénient de se fissurer plus facilement dans les manipulations et à la pose, ce qui rend d'ailleurs difficile la mise en place par temps très froids. Elle donne une résistance d'isolement élevée, par suite de la présence d'une assez grande quantité de matières résineuses; la résistance à la tension continue est également grande.

» La seconde catégorie présente pour la pose et pour les déplacements de câbles des qualités remarquables. Elle possède une résistance d'isolement généralement plus faible que dans le cas précédent, et il en est de même pour la résistance à la tension continue. Nous pouvons citer des claquages provenant de ce que les parties huileuses s'étaient séparées nettement des autres parties constituantes de la matière isolante, et s'étaient accumulées à la partie inférieure du câble; l'arc jaillissait tout le long de cette traînée huileuse, laquelle mesurait une fois 30 cm de long. On sait, en effet, que les huiles ont une faible rigidité en courant continu. Un autre inconvénient concerne les câbles posés en déclivité : aux époques chaudes de l'année, surtout si la canalisation n'est pas à une certaine profondeur dans le sol, la partie fluide de la matière tend à gagner les parties basses de la canalisation, ce qui assèche les parties hautes et peut, au bout d'un certain temps, amener des défauts.

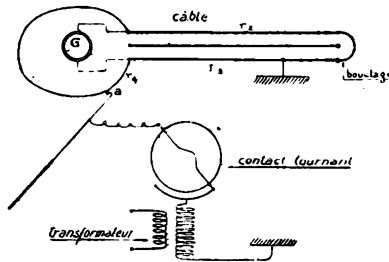
» La dernière catégorie s'est toujours montrée supérieure. Elle n'a donné que peu de défauts, en même temps que des résultats beaucoup plus comparables au point de vue de l'homogénéité. C'est avec certains câbles de cette sorte qu'on a pu atteindre, sans danger, pour une tension normale de 15 000 volts, des tensions d'essai de 90 000 et de 100 000 volts. La résistance d'isolement a donné également des valeurs élevées.

» En résumé, les canalisations correspondant à ces différentes catégories ont résisté à une tension continue de cinq fois la tension normale et ont donné satisfaction depuis leur mise en service. Mais il serait néanmoins intéressant de savoir si les câbles qui résistent à une tension continue plus élevée ne possèdent pas également, toutes choses égales d'ailleurs, plus de garanties pour les exploitants que les autres câbles. C'est ce que montrera l'expérience. Mais c'est aussi une question que les constructeurs pourraient, sans doute, solutionner plus rapidement.

» Il nous reste à dire maintenant quelques mots sur la recherche des défauts qui se déclarent dans les canalisations souterraines. Comme le savent bien les spécialistes, c'est une opération délicate.

La méthode la plus généralement employée est celle de la boucle, qu'on réalise avec un galvanomètre sensible et une boîte de piles donnant une centaine de volts. Quand le défaut présente une résistance d'isolement très faible, la mesure se fait simplement et l'on trouve l'emplacement avec plus de précision, suivant le degré d'habileté de l'opérateur, et suivant la plus ou moins grande importance des courants parasites dont le câble peut être le siège. Quand ceux-ci prennent une grande amplitude, comme cela arrive souvent à Paris ou dans ses environs, cette méthode donne pratiquement des résultats insuffisants.

» Au moment des essais relatés plus haut, et qui furent effectués en août 1912, à l'aide du contact tournant de Delon, nous eûmes l'idée, à l'occasion de la recherche d'un défaut par la méthode ci-dessus, d'employer comme source de courant l'appareil de Delon lui-même. Nous donnons ci-dessous le schéma de montage.



» Les résultats trouvés furent les mêmes par les deux méthodes et nous ne vîmes pas à cette époque l'avantage que pouvait présenter cet appareil lourd et encombrant.

» Ce n'est qu'un peu plus tard, en présence d'un défaut difficile à localiser, par suite de l'existence de courants parasites, que nous eûmes recours à cette méthode. Nous obtînmes sans difficultés une localisation parfaite. Les quelques chiffres qui suivent donnent un aperçu des résultats ainsi obtenus :

	Défaut localisé à	Défaut trouvé à	Erreur pour 100.
	m	m	m
Câble 15 000 volts (3 fois 150 ^{mm} ², long. environ 9500 ^m).....	6700	6695	0,07
	5825	5790	0,6
	2950	2902	1,6
	2551	2551	0
Câble 15 000 volts (3 fois 150 ^{mm} ², long. environ 1600 ^m).....	1363	1360	0,2
Câble 15 000 volts (3 fois 150 ^{mm} ², long. environ 5700 ^m).....	65,50	64,50	1,5
Câble 15 000 volts (3 fois 150 ^{mm} ², long. environ 9500 ^m).....	1043	1045	0,19

» Nous donnons ci-après tous les détails des opérations effectuées pour éliminer les défauts d'un câble à 15 000 volts, de trois fois 150 mm² et de 4700 m de long, avec l'appareil Delon.

» La tension continue est appliquée entre une phase et les deux autres phases à la terre; on monte jusqu'à 7500 volts pendant 7 minutes et le câble claque. On constate que le défaut est une réparation faite en usine. On recommence l'essai huit autres fois et l'on trouve au total neuf défauts analogues. A chaque fois la tension atteint une valeur supérieure à 70 000 volts, et à quatre reprises elle atteint 75 000 volts pendant plusieurs minutes. La recherche des défauts ne présente pas de difficultés et est faite à chaque fois par le procédé ordinaire. Lorsque les neuf défauts ont été éliminés la tension est poussée jusqu'à 70 000 volts entre une phase et la terre; il y a aussitôt claquage. La recherche du défaut est difficile par la méthode habituelle, par suite de la présence de courants vagabonds. On se sert du contact tournant, comme pour tous les défauts qui vont suivre et l'on obtient facilement la localisation du point défectueux à 3372 m d'un des bouts. On trouve précisément, à 3380 m, une boîte qu'on ouvre, et l'on constate qu'il y a une poche d'air. Les deux tronçons sont reconnus bons à l'essai d'isolement.

» La réparation faite, la tension est poussée jusqu'à 75 000 volts entre la phase 1 et la phase 2 à la terre, et peut être maintenue pendant 15 minutes, limite imposée par le cahier des charges.

» Entre la phase 0 et la phase 1 à la terre, on applique la tension qui atteint 75 000 volts, mais le claquage se produit aussitôt. On recherche le défaut et on le localise à 1240 m; mais on constate que, si l'on maintient l'application du courant sur le câble, la distance va en croissant constamment. On a pensé que cela pouvait provenir de ce qu'il y avait plusieurs défauts sur le câble. On a alors ouvert une boîte à 1237 m et constaté qu'elle avait une poche d'air pouvant devenir dangereuse pour le câble alimenté à 15 000 volts. Les deux tronçons présentent à l'essai d'isolement, comme on l'avait soupçonné, des défauts qu'on fait disparaître par la suite.

» Il est intéressant de noter, en passant, que sur un câble présentant plusieurs défauts, le défaut prédominant a été trouvé par cette méthode, avec une erreur de $\frac{3}{1237}$, c'est-à-dire négligeable.

» Après la remise en état de la boîte, on procède à un nouvel essai : la tension est maintenue entre la phase 0 et la phase 1 à la terre, mais on observe des fuites très importantes et l'appareil fournit une puissance très grande. On met alors la tension entre la phase 2 et la phase 0 à la terre; on atteint ainsi 40 000 volts, et la phase 2 claque. Ce défaut résiste et est très difficile à brûler; mais comme on soupçonne la boîte d'extrémité, on ouvre cette

dernière qu'on reconnaît défectueuse par suite de la présence de plusieurs poches d'air.

» On procède à la réfection de cette boîte, et l'on met la tension entre la phase 2 et la phase 1 à la terre; un claquage se produit à 40 000 volts mais le défaut résiste. Pour gagner du temps on sectionne le câble, afin de diminuer la capacité; on peut alors brûler rapidement le défaut. On localise ce dernier à 2044 m et l'on trouve une boîte mauvaise à 2034 m (erreur $\frac{10}{2034}$).

» Lorsque cette boîte est refaite, on essaie la tension entre la phase 2 et la phase 1 à la terre; il y a claquage à 50 000 volts. La localisation donne un défaut à 3575 m, alors qu'on le trouve dans une boîte à 3583 m. Après réparation, on claque de nouveau entre la phase 2 et la phase 1 à la terre, à la tension de 70 000 volts. C'est la boîte venant d'être refaite qui est de nouveau mauvaise.

» On remet la boîte en état, et l'on trouve un défaut sur la phase 2, on le localise à 1734 m et on le trouve à 1730 m dans une boîte contenant une poche d'air.

» On refait la boîte et la tension de 75 000 volts est maintenue, entre la phase 2 et la phase 1, à la terre pendant 15 minutes.

» On essaie alors la phase 1 par rapport à la phase 0 à la terre, et il y a claquage à 70 000 volts. On localise le défaut à 2012 m et l'on trouve à 2014 m une boîte où il y a un léger manque d'adhérences entre la matière et le câble.

» Une fois la boîte réparée, les trois phases supportent pendant 15 minutes 75 000 volts entre phases, et entre phases et terre. La canalisation fut ainsi réceptionnée.

» Notons en passant que plusieurs de ces défauts ont pu être localisés alors qu'ils présentaient encore une résistance d'isolement de 1 mégohm à 2 mégohms.

» L'histoire de ce câble est très instructive; elle permet de faire les constatations suivantes :

» 1^o Les neuf claquages du début correspondaient à des réparations faites en cours de fabrication. Les essais en usine n'avaient pas décelé ces faiblesses, l'application du courant continu les a dévoilées immédiatement.

» 2^o Après élimination de ces défauts aucun claquage ne s'est reproduit dans le câble lui-même, malgré de nombreux essais à des tensions atteignant parfois 75 000 volts.

» 3^o Il est survenu ensuite neuf claquages dans les boîtes à des tensions allant jusqu'à 75 000 volts. Nous avons, d'ailleurs, retrouvé les mêmes défauts dans beaucoup d'autres canalisations, ce qui

indique qu'on n'apporte pas toujours, dans la confection de ces boîtes, tout le soin nécessaire.

» 4^o La matière employée dans les boîtes avait été choisie dans une intention très louable, parce que présentant de très grandes qualités isolantes; mais elle avait l'inconvénient de n'adhérer parfaitement ni au papier du câble, ni aux serre-fils, ni à la boîte.

» D'après cela il paraît indispensable, pour éviter toute solution de continuité, que la matière de la boîte soit la même que celle employée pour imprégner les câbles; et il y a simplement une question de grandeur convenable à donner aux boîtes de jonction et d'extrémités.

» 5^o Comme on l'a vu, le câble a supporté au total 18 claquages et de très nombreuses applications du courant continu atteignant 70 000 et 75 000 volts. Il a finalement supporté l'essai imposé à 75 000 volts pendant 15 minutes, entre les trois conducteurs et entre chacun d'eux et l'armature. Il est intéressant d'ajouter que depuis cette époque, ce câble se porte très bien, et il ne semble pas que l'essai en statique l'ait fatigué le moins du monde.

» Nous nous résumerons en disant que l'application du courant continu pour les essais de réception après pose, a permis de déceler et de brûler tous les défauts qui se sont déclarés sur un réseau de plus de 300 km, ainsi que de localiser très facilement et très exactement tous les défauts difficiles à trouver. Enfin l'emploi de ce courant pour les essais n'a donné lieu, depuis plus de 7 ans, à aucune difficulté et à aucun ennui.

» 3. *Exploitation.* — Lorsqu'une canalisation haute tension a subi avec succès les essais d'épreuve après pose, on la réunit aux installations par l'intermédiaire de sectionneurs et de disjoncteurs. Elle se trouve alors en contact avec un grand nombre d'isolateurs qui, comme les boîtes, sont des points faibles.

» A partir de cet instant on ne sait plus dans quel état se trouve la canalisation. Pour s'en rendre compte, il faut avoir recours à l'essai d'isolement, bien qu'on sache qu'il n'a pas une signification réelle. Cet essai prend cependant une plus grande valeur, si l'on a eu soin d'y recourir pour tous les câbles, au moment de la réception en usine, et de noter les valeurs obtenues. On sait, en effet, par expérience, l'ordre de grandeur des chiffres qu'on doit trouver, par ce même procédé, une fois la pose effectuée. Comme en outre, les câbles sont toujours suffisamment enfouis dans le sol, la résistance d'isolement ne varie que dans de faibles limites et

les chiffres doivent être comparables pour tous les conducteurs. Le contraire serait l'indice d'un défaut qui va se déclarer.

» C'est ainsi que nous avons pu éviter bien des fois des accidents d'exploitation, et nous donnons ci-après deux cas de défauts intéressants :

» Un câble qui donnait habituellement 18 à 20 mégohms pour chacun des conducteurs, accusa un jour 8 mégohms pour l'une des phases seulement. Ce fléchissement de la résistance provenait d'une condensation insignifiante à l'intérieur d'une boîte de jonction, dans laquelle se trouvait un léger vide à la partie supérieure. Cette trace d'humidité n'intéressait que le conducteur le plus proche.

» Un autre câble qui accusait habituellement 20 mégohms pour chacun de ses conducteurs ne donna plus un jour que 5 à 6 mégohms. On découvrit que le défaut avait été déterminé dans un dépôt, par des escarbilles incandescentes qui avaient été jetées à l'endroit du passage de cette canalisation. Celle-ci avait tellement chauffé que l'enveloppe de plomb était fondue.

» On voit combien il est utile que les câbles soient essayés à l'isolement d'une façon périodique. Grâce à cette précaution nous n'avons jamais eu à enregistrer d'accidents graves.

» Voici maintenant un problème qui se pose souvent en cours d'exploitation :

» Un défaut étant en voie d'aggravation, comment arriver à trouver son emplacement exact?

» La plupart du temps ce sont, à vrai dire, des indices extérieurs, voire même des pressentiments, qui mettent sur la trace du défaut. Quand on dispose d'un procédé de mise en tension progressive, on y a parfois recours, mais cela ne réussit pas toujours. On est donc réduit fréquemment à procéder au débranchement de quelques boîtes, de façon à enfermer le défaut dans une longueur de câble comprise entre deux boîtes consécutives. Hélas ! c'est souvent là que commencent les réelles difficultés, et cependant il faut aller vite, car le besoin de cette canalisation se fait sentir. Enfin quand, favorisé par la chance, le câble est remis en état, on prend son isolement, et, si on le peut, on l'essaie à la tension progressive. Mais que vaut cette épreuve?

» Nous avons pu constater, à différentes reprises, que des câbles qui s'étaient très bien comportés à cet essai, claquaient dès leur mise en charge. C'est pourquoi nous pensons que l'essai en courant continu donnerait plus de sécurité.

» Quand un câble accuse un défaut on pourrait, à notre avis, aggraver ce défaut par l'application du courant continu, dont il

serait possible toutefois de limiter la valeur à trois fois, par exemple, celle de la tension normale. La recherche deviendrait alors beaucoup plus rapide et moins coûteuse. On pourrait de même après réparation procéder à une nouvelle application du courant continu à tension réduite.

» Nous estimons que cet essai serait également fort intéressant pour vérifier si les installations haute tension qui comportent des isolateurs ne présentent pas de points faibles. Il permettrait, sans doute, d'éliminer les défauts et les fissures de ces isolateurs qui sont des causes sérieuses de danger, plus particulièrement pour les disjoncteurs et pour les câbles.

» Nous devons indiquer ici que, faute d'appareil pratique fabriqué en France au début de l'exploitation, nous disposions jusqu'ici pour les mesures d'isolement et les recherches de défauts, d'un appareil étranger. Nous possédons seulement depuis quelques jours le nouvel appareil Geoffroy-Delore-Masson, fabriqué par la maison Carpentier, qui, par sa disposition heureuse et ses caractéristiques, semble appelé à rendre de réels services.

» Les essais mentionnés dans cette Note ont été effectués par MM. Barillot, sous-chef du Laboratoire électrotechnique des Chemins de fer de l'État, et Leroy, sous-chef de section.

» Nous ne pouvons terminer sans parler des travaux de grand intérêt concernant l'unification des règlements pour le matériel électrique. Ils ont pour but la vente à des prix raisonnables de produits présentant de sérieuses garanties. Aussi les exploitants dont les câbles, posés dans des endroits convenables où ils ne risquent d'être ni atteints, ni fréquemment changés de place, ont à assurer un service défini, sans trop d'imprévus ni d'aléas, ces exploitants, dis-je, pourront y avoir recours en toute tranquillité. Quant à ceux qui assument la responsabilité de grandes entreprises, comme des entreprises publiques, ils trouveront dans ces règlements des bases solides. Quelques conditions complémentaires seront parfois nécessaires, et nous avons indiqué dans ce qui précède comment, par une dure expérience, nous avons été amenés à les envisager.

» Nous sommes persuadés, d'ailleurs, qu'en raison des tensions beaucoup plus élevées qui seront employées dans un avenir prochain, la construction des câbles haute tension fera un tel progrès, que les tâtonnements et les petites difficultés actuels disparaîtront rapidement. »

M. GROSSELIN. — Parmi les conclusions auxquelles est arrivé

M. Lebaupin, je tiens à souligner celle qui confirme certaines prévisions faites au moment où a été introduit l'appareil Delon : c'est que, d'après l'expérience maintenant acquise, l'essai, même réitéré, en courant continu à haute tension, ne détermine aucune fatigue appréciable dans le diélectrique, et que les exploitants ont ainsi en mains un moyen commode et sans danger de contrôler l'état de leur réseau, soit après un incident ayant pu déterminer des surtensions, soit à intervalles périodiques.

» Au sujet de l'emploi du même appareil à la localisation des défauts, j'ai reçu de M. Widmer, directeur des Services de la Canalisatation à la Compagnie de Distribution d'Électricité, une Note dont je vais vous donner lecture et que je demande à notre Secrétaire général de vouloir bien insérer au *Bulletin*.

» Je crois devoir appeler votre attention sur les dates figurant à cette Note, celle des premières applications de la méthode, soit décembre 1912, et celle de la remise de la Note elle-même, soit le 13 mai 1919.

» Il en résulte en somme que, comme les ingénieurs de l'Ouest-État, et à peu près à la même époque, les ingénieurs de la Compagnie de Distribution ont eu à surmonter les mêmes difficultés et y sont arrivés par l'emploi des mêmes méthodes.

*Méthode générale de localisation des défauts sur les câbles armés
par l'emploi du contact tournant Delon (1).*

» La méthode classique de la boucle pour la recherche des défauts sur les câbles armés est souvent impossible à réaliser sur les réseaux à haute tension, par ce fait que le défaut offre une très grande résistance.

» Il arrive fréquemment qu'au moment du claquage du câble, le défaut présente une résistance très faible; mais l'huile contenue dans les câbles se répandant entre les points d'éclatement, le défaut semble disparaître.

» En fait, il existe toujours et, si sa résistance ohmique devient très grande, il est cependant impossible de maintenir le câble sous sa tension de régime.

» Dans ce cas, la méthode consiste à essayer d'aggraver le défaut en remettant le câble sous tension progressive jusqu'au claquage.

» Cette opération, qui nécessite un montage spécial à l'usine, demande à être exécutée avec prudence pour ne pas brûler complètement le câble et enlever parfois toute possibilité de localisation.

» Le contact tournant Delon remédie à tous ces inconvénients et permet de localiser les défauts les plus résistants, ainsi que les défauts provenant du rapprochement de deux conducteurs séparés par une couche d'air.

(1) Note de M. Widmer du 13 mai 1919.

» Les premiers essais de ce genre furent exécutés en décembre 1912 à la Compagnie Parisienne de Distribution d'Électricité dans les conditions suivantes :

» Un câble de plus de 12 km, dont l'isolement était de 300 Ω , ne pouvait être mis en service sous sa tension de régime de 12 300 volts alternatifs.

» On procéda à l'essai sous tension avec l'appareil Delon et l'on obtint un premier claquage vers 20 000 volts continus.

» Après plusieurs minutes de marche, on arrêta l'appareil Delon et l'on constata que l'isolement du câble était descendu à 20 Ω .

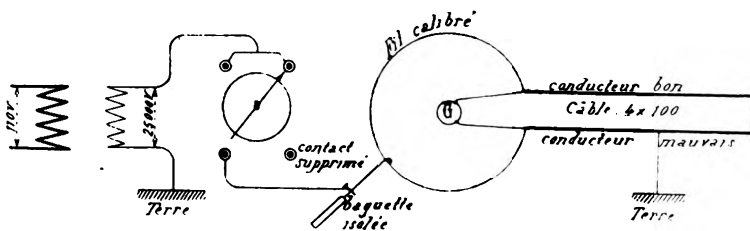
» On essaya alors de brûler le défaut en augmentant le débit sur le contact tournant, mais, après plusieurs heures, la résistance du défaut était encore de Ω et l'on ne put descendre au-dessous de cette valeur.

» On chercha à localiser le défaut au moyen d'une batterie de 120 volts, mais sans résultat.

» Devant l'impossibilité d'avoir immédiatement une batterie d'un voltage supérieur, on pensa à se servir de l'appareil Delon, qui donnait un courant redressé sensiblement continu, pour obtenir une force électromotrice plus grande.

» Le transformateur employé étant du rapport $\frac{110}{25000}$ on avait donc une tension maximum de $2 E \sqrt{2} = 75\,000$ volts continus, il ne fallait donc que 0,22 volt au primaire pour obtenir 150 volts en courant continu aux bornes du contact.

» Pour cela, on décala le plateau fixe du contact tournant de manière à recueillir le courant, non plus au sommet de la sinusoïde, mais en un point voisin de l'axe des abscisses; on supprima un des contacts, on brancha la borne libre du circuit haute tension du transformateur à la terre et le curseur sur le fil calibré fut constitué par la baguette isolée de court circuit que l'on relia au fil de tension du contact tournant. On eut ainsi le montage ci-dessous :



» Le galvanomètre fut aussi soigneusement isolé.

» Les premiers essais ne donnèrent aucun résultat. On continua alors à monter progressivement la tension en déplaçant le plateau des contacts vers sa position de maximum.

» Lorsque la tension de claquage du câble fut atteinte, on obtint une déviation sur le galvanomètre.

» A ce moment, en effet, l'arc qui s'amorçait au point défectueux du câble supprimait la solution de continuité formée par la résistance du défaut et il était dès lors possible d'effectuer la localisation.

» Cette première localisation ayant donné un certain point, on fit ouvrir les manchons situés de part et d'autre de ce point et la longueur ainsi isolée fut reconnue défectueuse.

» On recommença directement l'opération de localisation sur cette longueur en installant

le contact tournant à une extrémité. Le courant nécessaire à l'appareil Delon était fourni par l'usine qui envoyait du courant à 110 volts par la portion de câble reconnue bonne.

» Cette deuxième localisation permit de déterminer un nouveau point voisin du premier.

» Après avoir mis le câble à découvert, on put constater que le défaut réel se trouvait à 1 m environ du point calculé.

» Depuis, d'autres recherches de défaut furent encore effectuées et la même précision fut obtenue, ce qui confirme la valeur de la méthode.

» *Note sur l'état d'un réseau de câbles souterrains après un bombardement.* — Permettez-moi de profiter de ce que nous parlons de canalisations souterraines pour relater ici un fait observé sur un réseau de câbles abondamment bombardé, celui de la ville de Reims.

» Les clichés que je fais défiler sous vos yeux vous montrent la conscience avec laquelle les barbares ont écrasé une ville qui avait eu tort de ne pas se laisser prendre.

» Je rappelle que l'on évalue à un million le nombre d'obus, incendiaires pour la plupart, qui tombèrent sur la ville; l'usine à gaz en reçut un millier.

» Après un tel déluge de fer, les parties apparentes de la canalisation, boîtes de regard, coffrets d'abonnés, raccords d'éclairage public, etc., sont dans le plus piteux état et, des rentrées d'eau s'étant produites de tous côtés, l'isolement général du réseau est nul.

» Cependant, sur d'importantes longueurs, les points de chute n'ont pas pénétré jusqu'aux câbles. Il parut donc intéressant de se rendre compte de ce qui pouvait subsister de ceux-ci sous la terre écrasée et l'on décida de faire quelques sondages en des points facilement accessibles, parmi les monceaux de plâtras qui encombrent les trottoirs.

» Trois longueurs de canalisations, de 40 m chacune, furent ainsi découvertes.

» Au droit de chaque point de chute, les câbles, après enlèvement des terres, présentaient une dénivellation de 20 cm à 30 cm, sur une longueur de 90 cm à 1,10 m.

» On fit un prélèvement sur un feeder à conducteur unique de faible section, ce qui correspondait au cas le plus favorable à la conservation intérieure du câble, pour une déformation extérieure donnée; la dénivellation était, sur ce feeder, de 20 cm.

» On fit les constatations suivantes :

» L'armure, constituée de feuillards de $\frac{8}{10}$ d'épaisseur, était intacte; le plomb avait été laminé vers le sommet de la courbe formée par le câble, ce qui s'explique du reste, mais il ne portait aucune trace de fissure.

» L'isolant, au contraire, quoique resté suffisamment gras, bien

que l'âge du réseau fût de 18 ans, présentait, tous les centimètres environ, des déchirures perpendiculaires à l'axe du câble et assez profondes pour atteindre le conducteur de cuivre.

» Un isolant ainsi fissuré ne joue plus qu'un rôle essentiellement précaire : la moindre rentrée d'humidité ou la moindre surtension doivent déterminer une mise à la terre.

» Étant données les conditions dans lesquelles le prélèvement avait été fait, on peut, je crois, généraliser la conclusion et affirmer que, dans un réseau qui a été sérieusement bombardé, les câbles souterrains, même s'ils ne portent pas d'avaries visibles, sont irrémédiablement perdus et que leur remplacement s'impose.

» C'est à ce titre qu'il m'a paru intéressant de vous apporter cette observation, malgré son peu d'importance apparente.

» Je tiens, en terminant, à remercier vivement M. Moreau, directeur de la Compagnie du Gaz et de l'Électricité de Reims, qui a bien voulu autoriser cette Communication et mettre à ma disposition les clichés que j'ai projetés sous vos yeux. »

M. MASSON. — « Messieurs, de la Communication de M. Lebaupin ressort nettement l'utilité des essais à haute tension continue. M. Delon qui en est le promoteur peut se féliciter d'avoir ouvert une voie féconde.

» Je considère ces essais comme indispensables, non seulement après pose, mais même en usine. Je ne crois pas que la pose ait aggravé de façon sensible certains des défauts de fabrication signalés par M. Lebaupin. Le courant continu les aurait décelés en usine.

» Les plus graves, à mon avis, sont les défauts d'imprégnation. Afin d'employer une expression qui fasse image, je dirai que le rapport de méchanceté entre le courant continu et le courant alternatif n'est pas le même pour le diélectrique sain, et pour le papier mal imprégné. Le courant continu n'est méchant que pour les défauts.

» Je vous citerai un câble ayant résisté à 20 000 volts alternatifs pendant un quart d'heure, et qui a claqué aussitôt après à 32 000 volts continus. Cause nettement reconnue : défaut d'imprégnation.

» Le cahier des charges type doit donc prévoir ces essais. La sécurité des exploitants le réclame ; l'intérêt bien compris des fabricants n'y est pas opposé. « Bien faire » est encore la meilleure devise du constructeur français.

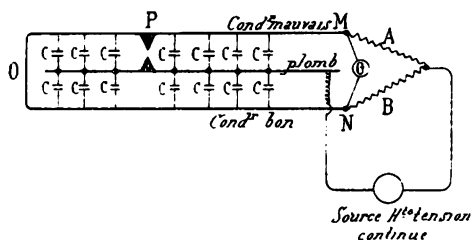
» Voici une autre remarque relative à la localisation des défauts sous haute tension continue :

» Considérons la méthode de la boucle appliquée à la recherche d'un défaut en P, que je figure par deux pointes pour spécifier que l'étincelle ne jaillit qu'à partir d'une certaine tension. La capacité de chaque conducteur par rapport au plomb peut se représenter par des condensateurs c . Pour plus de simplicité, je ne représente pas ici la capacité mutuelle des conducteurs, qui ne modifie pas d'ailleurs le mécanisme des phénomènes.

» Cela étant, le galvanomètre subit plusieurs influences :

» Considérons tout le système au potentiel zéro, et faisons débiter la source.

» 1^o Les condensateurs c se chargent à un certain potentiel U . Dans cette charge, il y a symétrie pour les deux conducteurs, et pour que le galvanomètre ne dévie pas, il faudrait $A = B$.



» 2^o La source alimente de plus les fuites: effluves, défauts d'isolement, et polarisation du diélectrique. Pendant cette période, l'équilibre du galvanomètre correspondrait donc à d'autres valeurs de A et B, dépendant de chaque cas particulier.

» 3^o L'étincelle jaillit en P. Les condensateurs c se déchargent (sous forme de décharge oscillante à fréquence élevée) d'une certaine quantité. Le courant venant de chacun d'eux choisit le chemin électriquement le plus court (remarquer que la terre fait partie de ce chemin, ce qui ne simplifie pas la question). La résistance et la self de la source étant grandes par rapport à celles du câble, on peut considérer que cette décharge se fait seulement par le circuit (M, A, B, N, O, P) et la terre. Quels que soient A et B, il passe donc du courant dans le galvanomètre. Pour qu'il n'en passe pas, il faudrait que le défaut se trouvât en O, auquel cas il y aurait symétrie pour les deux conducteurs.

» 4^o Un arc étant amorcé par cette étincelle, la source débite un certain courant dans le défaut. Puis l'arc s'éteint, et la source apporte à nouveau de la charge aux condensateurs c .

» Vous voyez donc que sur quatre phénomènes, les trois premiers

sont parasites, et que le galvanomètre enregistre une véritable macédoine de courants.

» Le deuxième est souvent négligeable, mais le premier et le troisième dépendent de la capacité, et de la tension U à laquelle jaillit l'étincelle. Si cette tension est de plusieurs milliers de volts, et si la capacité est grande, leur effet peut être très important.

» Le premier fait trouver un point trop long, et le troisième un point trop court. Mais il faut remarquer qu'avec un galvanomètre à période propre relativement courte (comme c'est le cas, pour les milliampèremètres dont on se sert dans ces mesures), l'action du premier est en général à peu près terminée au moment où il subit celles du troisième et du quatrième qui, elles, sont presque simultanées. Finalement on trouve un point trop court.

» Par exemple, M. Lebaupin vous a cité un cas où la mesure donnait un point qui s'éloignait constamment. Ce résultat s'explique facilement en admettant que par suite des décharges successives, la tension U diminuait, ou bien encore parce que l'on faisait débiter davantage à la source. L'effet du phénomène n° 3 diminuait donc aussi, mais néanmoins le point trouvé devait rester trop court.

» L'étude complète de la question sortirait du cadre de ces remarques. J'ai voulu seulement attirer votre attention sur les causes d'erreur de la méthode. De toutes façons, il vaut mieux faire la mesure du point le plus éloigné du défaut.

» Enfin, il faut remarquer que cette méthode, bien que précieuse quand on ne peut faire autrement, nécessite une installation compliquée, et de plus ne s'applique pas aux conducteurs coupés. La localisation sous courant basse tension est infiniment plus rapide et plus commode.

» Sur le réseau à 5000 volts de l'Est-Lumière en particulier, dont la complexité est à peu près aussi grande que celle d'un réseau basse tension ordinaire, la localisation par ce procédé est très laborieuse, et je ne me résous à l'employer que lorsque le défaut manifeste pour brûler une mauvaise volonté par trop évidente. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Lebaupin de son intéressante communication : il remercie également M. Grosselin et M. Masson des observations qu'ils ont présentées sur le même sujet.

AMPLIFICATEURS DIVERS.

M. Marius LATOUR. — « Le problème de l'amplification des courants faibles, de la réalisation d'un relais sans inertie, a fait depuis longtemps l'objet des recherches des physiciens et des ingénieurs. Le projet même d'utiliser les phénomènes liés au passage du courant dans les tubes à vide comportant une cathode excitée et réalisée soit sous la forme d'un arc auxiliaire, soit sous la forme d'un filament incandescent, est assez ancienne.

» En 1905, nous eûmes déjà l'idée (voir Brevets américains Latour-Weintraub, nos 921930 et 1041210 de 1907) d'utiliser la résistance négative d'un tube à vapeur de mercure pour amplifier un courant faible. Un tube à vapeur de mercure tel que nous le

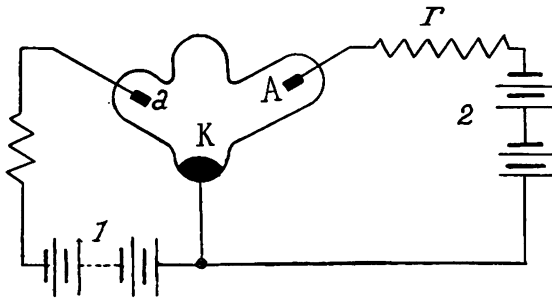


Fig. 1.

concevions pour cet emploi comporte (voir *fig. 1*) une cathode K immergée dans le mercure et deux anodes A et *a*. L'anode *a* sert à entretenir en permanence un petit arc auxiliaire grâce à la pile 1. De cette façon, la cathode K étant maintenue excitée, c'est-à-dire en état d'ionisation, on sait que la conductibilité électrique du tube est assurée dans tout son volume. Une pile 2 alimente l'anode A à travers une résistance de protection *r* et la tension de la pile 2 reste telle, que l'on travaille avec des courants faibles et avant le régime de l'arc. Dans ces conditions, nous avons trouvé expérimentalement avec M. Weintraub, en faisant varier la tension de la pile 2, que la chute de potentiel entre A et K, pour certaines valeurs de courant, diminue quand le courant augmente (voir la partie *ab* de la courbe de la figure 2). Le tube même se comporte donc, pour des courants faibles précédant le régime de l'arc, comme une véritable résistance *négative*. Cette constatation étant faite, imaginons

(voir *fig. 3*) que l'on intercale dans un circuit extérieur contenant une source S dont la réactance propre est équilibrée par un condensateur K , à la fréquence considérée, le tube de la figure 1. Le courant faible engendré par la source S et dont l'intensité est limitée

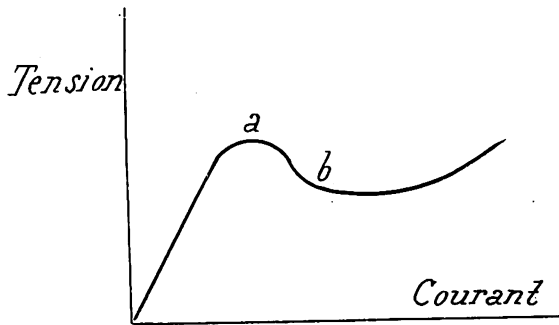


Fig. 2.

par la résistance d'utilisation R qu'il traverse doit être amplifié. En effet, la résistance négative du tube tend à contre-balancer la résistance positive d'utilisation R aussi bien que la résistance intérieure de la source S . Théoriquement on pourrait même supposer qu'elle l'équilibre absolument et qu'une tension très petite donne lieu à un courant maximum dans la résistance d'utilisation R . D'ailleurs, pour une valeur résultante négative de la résistance du circuit

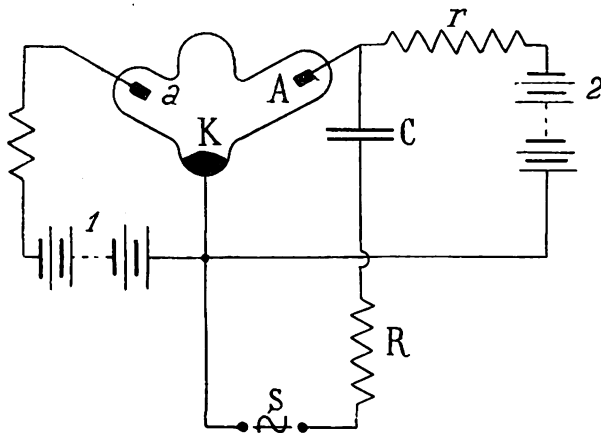


Fig. 3.

contenant la source S et obtenue en diminuant la valeur de R , on peut avoir du courant, même si la tension de la source S est nulle,

c'est-à-dire qu'on peut avoir des oscillations spontanées. C'est bien ce que l'expérience montre ⁽¹⁾.

» Le principe de l'amplification que nous venons de décrire consiste par suite à se rapprocher du régime d'amorçage des oscillations propres d'un système susceptible d'osciller. On doit affirmer que chaque fois qu'il est possible d'avoir des oscillations, on peut, en se rapprochant simplement des conditions d'amorçage, obtenir un système amplificateur. C'est ce principe général que nous avons énoncé en 1915.

» Suivant un principe différent, M. Lee de Forest a proposé d'autre part en 1907 de réaliser des amplificateurs avec les lampes à trois électrodes qu'il avait imaginées et désignées sous le nom d'*audions*. Le brevet américain n° 841387 est parfaitement explicite à cet égard. Une idée analogue a été d'ailleurs émise par von Bayer en 1908.

» Ces lampes ou tubes à vide à trois électrodes, qui ont été souvent décrits dans ces dernières années, comportent (voir *fig. 4*) : un

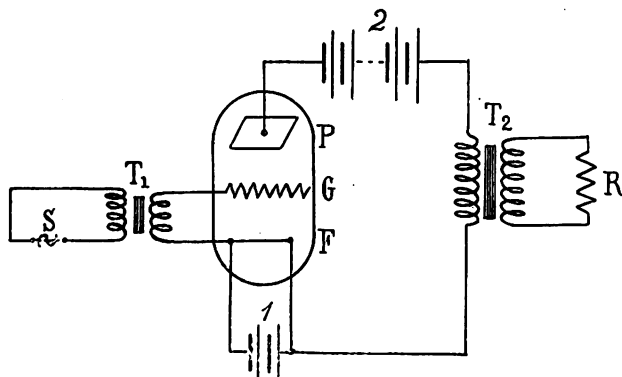


Fig. 4.

filament F porté à l'incandescence par la pile 1, une anode principale ou plaque P alimentée par la pile 2, une anode auxiliaire ou grille G réalisée par exemple sous la forme d'un treillis métallique. C'est le filament incandescent qui représente la cathode excitée; son incandescence maintient la conductibilité du tube et l'on doit se rendre compte que le filament incandescent remplace à lui seul l'arc auxiliaire, c'est-à-dire l'anode *a* et la cathode *K* de la

(1) Un pareil générateur a été utilisé pour nous pour la réception hétérodyne en T. S. F. au lieu et place d'un générateur à trois électrodes (Meissner) dont nous parlons plus loin.

figure 1. La grille G introduite par de Forest constitue véritablement une électrode supplémentaire.

» Le courant à amplifier provenant de la source S est amené par un transformateur T₁ entre la grille et le filament, et le courant amplifié est rendu par le transformateur T₂ dans la résistance d'utilisation R.

» L'électrode auxiliaire G est en quelque sorte une électrode de contrôle qui, suivant que son potentiel est positif ou négatif par rapport au filament, réduit ou augmente l'intensité du courant qui circule entre la plaque et le filament sous l'action de la pile 2. Si l'on assimile le tube à une conduite d'eau, on peut dire que la grille remplit la fonction d'une vanne qui est alternativement fermée et ouverte par l'action du courant alternatif à amplifier.

» Exactement le degré d'ouverture de la vanne supposée est réglé par la tension appliquée sur la grille.

» Les Autrichiens von Lieben et Reiss en 1911 envisagèrent des lampes à trois électrodes spéciales avec atmosphère de vapeur de mercure, inspirées à ce point de vue des tubes que nous avons déjà proposés. Les ingénieurs de la General Electric Cy réalisèrent au contraire plus récemment des tubes avec un vide extrêmement poussé. La Western Electric d'autre part a réalisé des lampes à vide non poussé, mais avec des filaments à oxydes rapportés propres à augmenter l'émission, c'est-à-dire la conductibilité du tube.

» Enfin, dans les années qui ont précédé la guerre, les Allemands aussi bien que les Américains ont publié des montages variés avec des lampes à trois électrodes. Ces publications ont sans doute l'inconvénient de détruire la nouveauté de certaines propositions faites au cours de ces dernières années en France, mais on ne doit pas oublier cependant que les amplificateurs avec lampes genre Audion étaient peu connus en 1914 et qu'il n'avait pas encore été produit à cette époque une étude théorique précise permettant, du point de vue ingénieur, d'établir rationnellement un appareil. C'est dans ces conditions que la Radiotélégraphie militaire sous la direction du général Ferrié a réalisé, ainsi que vous l'avez appris déjà par M. Gutton, les amplificateurs nécessaires à ses services. M. Abraham ne tarda pas à découvrir d'ailleurs toutes les caractéristiques possibles des tubes et à faire connaître toutes les constantes utiles. Il a été réalisé une lampe ou tube à vide modèle Télégraphie militaire qui, au point de vue constructif, présente certains avantages de simplicité, de solidité et de bas prix de revient.

» Dans ce modèle (voir *fig. 5*, brevet anglais n° 126658, aux noms de MM. Biguet et Péri), le filament, la grille et la plaque sont

disposés concentriquement ou fixés directement aux fils servant de conducteurs, ces fils étant scellés dans un même tube de verre soudé à l'ouverture de l'ampoule A. Le filament E placé au centre du système est tendu entre deux conducteurs présentant une certaine

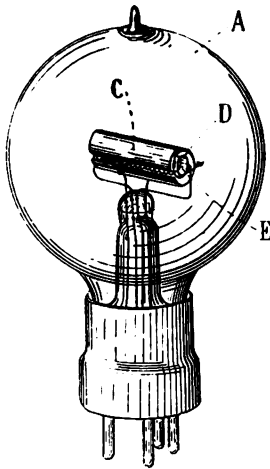


Fig. 5.

élasticité et la grille D formée d'un fil roulé en spirale est supportée par ses deux extrémités. La plaque cylindrique C enveloppant les deux autres éléments est rattachée à son conducteur par une ou deux agrafes.

» Mais quel que soit le modèle de lampe employée, c'est-à-dire quelles que soient les formes et dimensions des électrodes, quel que soit le degré de vide du tube et quelle que soit la nature des gaz ou vapeurs résiduels, on peut établir des équations générales qui permettent d'établir rationnellement les transformateurs T_1 et T_2 en fonction de certaines constantes expérimentales des lampes qui sont faciles à mesurer.

» Une première approximation consisterait à assimiler le tube à un microphone. La tension variable appliquée à la grille aurait pour résultat de faire varier la conductibilité du tube et l'on établirait le transformateur T_2 en procédant par analogie avec la bobine d'induction d'un microphone. Une deuxième approximation consisterait à assimiler le tube à un générateur alternatif, siège d'une tension intérieure proportionnelle à la tension appliquée entre la grille et le filament, et ce générateur débiterait sur une résistance extérieure R à travers sa propre résistance intérieure. Ce sont bien ces deux approximations que nous avons faites en premier

lieu dans des Notes remises au général Ferrié en 1915 et en 1916 sous le titre *Résistance d'utilisation optimum dans les lampes relais*. Ces approximations d'ailleurs suffisantes sont devenues classiques aujourd'hui. Mais il arrive, en réalité, que la théorie complète se traite en toute rigueur à fort peu de frais et qu'il n'y a pas de nécessité à s'arrêter à ces approximations ⁽¹⁾.

» Soit I le courant de la plaque.

» D'une façon générale et absolue, ce courant est une fonction du potentiel V de la plaque et du potentiel ν de la grille appréciés par rapport à un point quelconque du filament (par rapport au pôle — du filament par exemple). On a donc

$$I = F(V, \nu).$$

» Au repos, le potentiel de la plaque, dès qu'on néglige la résistance du primaire, connecté à la plaque du transformateur T_2 , est le potentiel V_0 correspondant à la tension de la pile 2. Quant au potentiel ν_0 de la grille, il pourrait être de même en toute généralité fixé par une pile auxiliaire qui serait en série avec l'enroulement secondaire connecté à la grille du transformateur T_1 . C'est ce qui existe d'ailleurs dans certains amplificateurs.

» Soit I_0 la valeur du courant plaque-filament pour des potentiels V_0 et ν_0 de la plaque et de la grille.

» Autour de ce point de fonctionnement, on aura pour des valeurs de I , V et ν voisines de I_0 , V_0 , ν_0 :

$$(I - I_0) = \left(\frac{\partial I}{\partial V} \right)_{\nu=\nu_0} (V - V_0) + \left(\frac{\partial I}{\partial \nu} \right)_{V=V_0} (\nu - \nu_0).$$

» Les facteurs de $(V - V_0)$ et $(\nu - \nu_0)$ sont les dérivées partielles pour $V = V_0$, $\nu = \nu_0$ de la fonction $I = F(V, \nu)$ signalée plus haut.

» Expérimentalement elles se déterminent très facilement. En maintenant un potentiel ν_0 sur la grille, on mesure la variation ΔI du courant I_0 correspondant à une variation ΔV du potentiel V_0 .

» Le quotient $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ représente la valeur $\left(\frac{\partial I}{\partial V} \right)_{\nu=\nu_0}$.

» En maintenant un potentiel V_0 sur la plaque, on mesure la variation ΔI du courant I_0 correspondant à une variation $\Delta \nu$ du potentiel ν_0 . Le quotient $\left(\frac{\Delta I}{\Delta \nu} \right)_{V=V_0}$ représente la valeur $\frac{\partial I}{\partial \nu}$.

⁽¹⁾ La théorie complète qui suit a été incorporée dans nos brevets de mars-avril 1916. Elle a été refaite depuis par des auteurs étrangers : américains, allemands et italiens.

» Plus généralement on dressera la courbe $I = F_1(V)$ pour un v_0 donné (voir fig. 6) et la courbe $I = F_2(v)$ pour un V_0 donné

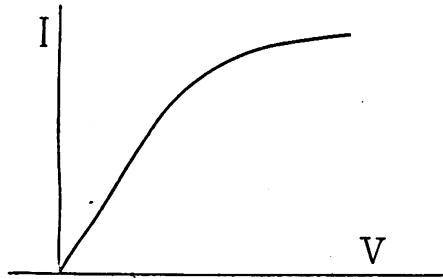


Fig. 6.

(voir fig. 7), on tracera des tangentes à ces courbes au point V_0 pour $F_1(V)$ et au point v_0 pour $F_2(v)$.

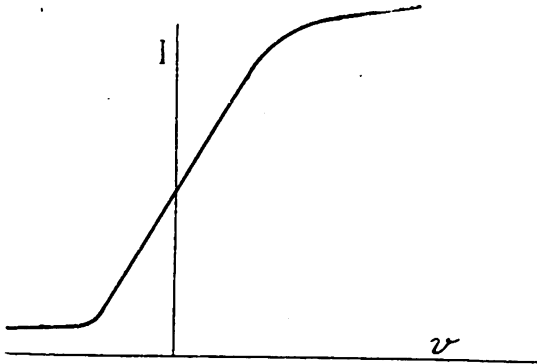


Fig. 7.

» On remarque de suite que les dérivées $\frac{\partial I}{\partial V}$ et $\frac{\partial I}{\partial v}$ ont les dimensions de l'inverse d'une résistance; on peut donc poser

$$\left(\frac{\partial I}{\partial V}\right)_{v=v_0} = \frac{1}{R_p}, \quad \left(\frac{\partial I}{\partial v}\right)_{V=V_0} = \frac{1}{R_g}.$$

» Les indices p et g indiquent que les résistances considérées se rapportent à l'action du potentiel plaque ou du potentiel grille.

On a donc

$$I - I_0 = \frac{V - V_0}{R_p} + \frac{v - v_0}{R_g}.$$

» De même que nous avons étudié le courant plaque-filament I

sous la **forme d'une fonction** $I = F(V, \varphi)$, nous pourrions étudier le courant grille **i** sous la forme d'une fonction $i = f(\varphi, V)$. De même, en posant

$$\left(\frac{\partial i}{\partial V}\right)_{\varphi=\varphi_0} = \frac{1}{r_p}, \quad \left(\frac{\partial i}{\partial \varphi}\right)_{V=V_0} = \frac{1}{r_g},$$

et en désignant par i_0 le courant de la grille pour les potentiels de repos φ_0 et V_0 , nous pourrions écrire :

$$i - i_0 = \frac{\varphi - \varphi_0}{r_g} + \frac{V - V_0}{r_p}.$$

» Si nous supposons maintenant que $\varphi - \varphi_0$ correspond à une tension alternative très petite u , $(i - i_0)$ devient un très petit courant alternatif j ; $(V - V_0)$ et $(I - I_0)$ deviennent respectivement une tension alternative U et un courant alternatif J qui représentent l'amplification de u et de j .

» On a les deux équations :

$$J = \frac{U}{R_p} + \frac{u}{R_g}, \quad i = \frac{u}{r_g} + \frac{U}{r_p}.$$

» Le courant alternatif J circulant dans le primaire du transformateur T_2 , sa valeur est limitée par la résistance d'utilisation R branchée sur le secondaire. Si l'on suppose un transformateur parfait (courant magnétisant nul, capacité nulle, pertes nulles) on peut dire que tout se passe en désignant par η le rapport de transformation du transformateur T_2 comme si le courant J traversait une résistance $\eta^2 R$. On a donc

$$U + \eta^2 R J = 0.$$

» Finalement on dispose du système d'équations :

$$J = \frac{U}{R_p} + \frac{u}{R_g}, \quad j = \frac{U}{r_p} + \frac{u}{r_g}, \quad U + \eta^2 R J = 0.$$

» Ce système se résout immédiatement. On trouve :

$$\begin{aligned} j &= \left[\frac{1}{r_g} - \frac{R_g \eta^2 R}{r_p R_g (R_p + \eta^2 R)} \right] u, \\ U &= - \frac{R_p \eta^2 R}{R_g (R_p + \eta^2 R)} u, \\ J &= \frac{R_p}{R_g (R_p + \eta^2 R)} u. \end{aligned}$$

» Pour savoir s'il y a effet relais, il suffit de comparer la puissance uj fournie au circuit grille-filament à la puissance UJ libérée dans le circuit plaque-filament. On doit donc faire le rapport $\frac{UJ}{uj}$.

On trouve

$$\frac{UJ}{uj} = r_g \left[\frac{R_p}{R_g} \right]^2 \frac{\eta^2 R}{(R_p + \eta^2 R) \left[(R_p + \eta^2 R) - \frac{r_g R_p}{r_p R_g} \right]}.$$

Dans tous les cas, il convient immédiatement d'attirer l'attention sur un point très important, à savoir qu'il existe une valeur de $\eta^2 R$ qui rend l'effet relais maximum. C'est une résistance d'utilisation optimum telle que

$$\eta^2 R = \frac{R_p}{\sqrt{1 - \frac{r_g R_p}{r_p R_g}}}.$$

» Par suite, il existe un rapport de transformation du transformateur T_2 qui donne une valeur maximum pour l'effet relais. Il est

$$\eta = \sqrt{\frac{R_p}{R \sqrt{1 - \frac{r_g R_p}{r_p R_g}}}}.$$

» Dans la lampe modèle Télégraphie militaire travaillant de 70 à 100 volts sur le circuit plaque et dans laquelle le courant à amplifier est amené entre la grille et le pôle moins du filament, on a

$$\begin{aligned} R_p &= 15 \text{ à } 20000 \text{ ohms,} \\ R_g &= 2 \text{ à } 3000 \text{ »} \\ r_g &= 250 \text{ à } 400000 \text{ »} \\ r_p &= 50 \text{ à } 100 \text{ mégohms.} \end{aligned}$$

» D'une façon générale, dans la plupart des lampes, le produit

$$\frac{r_g}{r_p} \cdot \frac{R_p}{R_g}$$

est petit par rapport à l'unité et, pratiquement, on arrive à la conclusion que l'on doit faire

$$\eta = \sqrt{\frac{R_p}{R}},$$

avec tendance à prendre R_p fort.

» Le transformateur T_2 est ainsi parfaitement déterminé. Si l'on veut que le transformateur travaille avec un bon facteur de puissance, comme nous l'avons admis par hypothèse, il faudra que sa réactance à vide (circuit secondaire ouvert) à la fréquence considérée soit relativement grande par rapport à $\eta^2 R$. Pratiquement à 800 périodes il suffira qu'elle soit deux à trois plus forte. Il serait facile de se rendre compte que si cette réactance est choisie trop faible, on améliorera les conditions en prenant un rapport η plus élevé. A ce propos, rappelons qu'aux faibles inductions envisagées, c'est une perméabilité de l'ordre de 200 qu'il faut admettre pour le circuit magnétique.

» Le volume du transformateur sera surtout fonction de l'isolement dont on entend se suffire. Le fil sous une couche soie, le fil émaillé, conduiront évidemment à des transformateurs beaucoup moins volumineux que les fils sous deux couches soie ou sous coton devant assurer le même rendement.

» D'autre part, les effets de capacité d'enroulement étant plus sensibles dans les transformateurs de faible volume qui comportent un rapprochement plus grand des conducteurs, ces derniers risqueront d'introduire une déformation plus importante de la parole.

» Cherchons maintenant à déterminer le rapport de transformation à donner au transformateur T_1 . La puissance amplifiée UJ étant, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à uj , on a intérêt à faire uj maximum, c'est-à-dire, en fin de compte, à extraire la puissance maximum de la source S . Dans ce but, il faut que la résistance apparente grille-filament rapportée au primaire du transformateur T_1 soit égale à l'impédance Z de la source. La résistance apparente grille-filament est égale, en se reportant à l'équation du courant grille j , à

$$Y = r_g \frac{R_p + \eta^2 R}{R_p + \eta^2 R \left[1 - \frac{r_g R_p}{r_p R_g} \right]}.$$

Si l'on suppose que $\frac{r_g R_p}{r_p R_g}$ est petit, on trouve

$$Y = r_g.$$

» Dans ces conditions, on prend pour le transformateur T_1 un rapport de transformation éleveur η'_1 tel que

$$\eta'^2_1 Z = r_g, \quad \eta'_1 = \sqrt{\frac{r_g}{Z}}.$$

Si l'on suppose toujours $\frac{r_g R_p}{r_p R_g}$ négligeable par rapport à l'unité, l'expression de l'effet relais que nous avons donnée plus haut se ramène pour $\eta^2 R = R_p$ à

$$\frac{UJ}{uj} = \frac{1}{4} \left(\frac{R_p}{R_g} \right)^2 \frac{r_g}{R_p}.$$

» Pour avoir un grand effet relais, on voit que l'on doit chercher à réaliser des lampes donnant lieu à un rapport $\frac{R_p}{R_g}$ le plus élevé possible et une résistance intérieure R_p le plus faible possible (lampes à forte émission). En partant de la tension u appliquée à la grille, on peut dire que le tube se comporte comme un alternateur de résistance intérieure R_p dans lequel la force électromotrice intérieure est égale à $\frac{R_p}{R_g} u = ku$. (Les Américains désignent le rapport k par l'expression « facteur d'amplification ».)

» Cette interprétation simple est celle prise aujourd'hui par les auteurs américains. C'est aussi celle que nous avions adoptée dans une Note de janvier 1916 rappelée plus haut ⁽¹⁾. On remarque aussitôt que, dans l'expression de l'effet relais, les tensions des piles 1 et 2 n'interviennent pas de façon directe. Elles n'interviennent en réalité qu'en modifiant les valeurs de R_p , R_g et r_g .

» L'augmentation de la tension de la pile 2 n'entraîne donc pas nécessairement une amplification plus forte.

» Au lieu de réaliser un amplificateur de puissance avec transformateurs T_1 et T_2 , on peut réaliser un amplificateur de tension en disposant simplement une résistance R en série dans le circuit plaque comme représenté sur la figure 8.

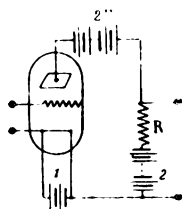


Fig. 8.

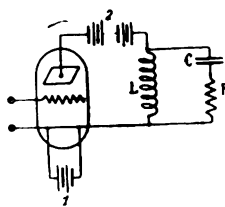


Fig. 9.

» En particulier on peut imaginer que la pile 2 soit divisée en

(1) Nous ne l'avons pas exposée dans notre article de l'*Electrician* de Londres du 4^{er} décembre 1916 pour n'avoir pas à faire connaître les constantes des lampes employées par la Télégraphie militaire française.

deux parties 2' et 2" de telle façon que, au repos, la tension de la pile 2' compense exactement la chute ohmique dans la résistance R .

» Dans un amplificateur à résistance on a les deux équations

$$J = \frac{U}{R_p} + \frac{u}{R_g},$$
$$U + JR = 0,$$

et l'on tire de là

$$U = - \frac{R_p}{R_g} \frac{R}{R_p + R} u.$$

» Imaginons que la pile 2" soit invariable et que l'on règle la pile 2' de façon à contre-balancer toujours la chute ohmique dans la résistance R , au fur et à mesure que la résistance R augmente, le rapport $\frac{U}{u}$ tend vers le rapport $\frac{R_p}{R_g} = k$ ⁽¹⁾.

» Dans ce que nous venons de dire, nous n'avons fait aucune hypothèse sur la grandeur de la fréquence du courant à amplifier. On peut donc imaginer que l'on amplifie avec des transformateurs d'aspect ordinaire et à circuit magnétique en fer les courants de réception de télégraphie sans fil. Il arrive seulement que les nombres de spires étant, au point de vue absolu, élevés, les effets de capacité entre spires et entre enroulements risquent de prendre une valeur dangereuse et de masquer le fonctionnement en transformateur. Des précautions spéciales doivent donc être prises dans la constitution du bobinage de ces transformateurs pour réduire les effets de capacité. En outre, on doit employer des tôles de $\frac{7}{100}$ à $\frac{8}{100}$ de millimètre ou du fil de fer de $\frac{10}{100}$ à $\frac{13}{100}$ de millimètre pour avoir un rendement suffisant. Nous avons réalisé des appareils dans ces conditions pour les fréquences les plus élevées.

» Il convient de remarquer cependant que dans le cas de la haute fréquence, on peut travailler dans le circuit plaque sans transformateur en utilisant la combinaison d'une self et d'une capacité en dérivation comme représenté sur la figure 9. On dispose alors la résistance d'utilisation en série avec un de ces deux éléments.

» Nous avons démontré antérieurement (1915) qu'il existe, pour R donné, un rapport déterminé $\frac{L}{C}$ qui permet d'obtenir un maximum de puissance amplifiée en partant d'une certaine tension oscillante appliquée entre la grille et le filament. On doit veiller en effet

(1) Des amplificateurs à résistance ont été réalisés par M. White en Amérique. Des amplificateurs plus intéressants à plusieurs étages ont été réalisés en France par MM. Beauvais et Brillouin et par MM. Abraham et Bloch.

à ce que la résistance apparente du circuit $L-C$, dans le circuit plaque-filament, soit de l'ordre de grandeur de la résistance intérieure de la lampe R_p .

» Pour que l'ensemble $L-C$ se comporte comme une résistance, il faut vérifier la relation :

$$(1) \quad 1 = \frac{\omega^2 CL}{2} + \frac{C \sqrt{L^2 \omega^4 + 4 R^2 \omega^2}}{2}.$$

» Cette condition étant réalisée, la valeur de la résistance apparente est

$$(2) \quad R + \frac{1}{C^2 \omega^2 R}.$$

Si l'on suppose que R est petit devant $L\omega$ ou $\frac{1}{C\omega}$, il arrive que la relation (1) se réduit à la condition de résonance et que la valeur de la résistance apparente suivant (2) devient égale à $\frac{L}{CR}$.

» On doit donc établir pour $\frac{L}{C}$ un rapport indépendant de la fréquence et tel que

$$\frac{L}{CR} = R_p.$$

» La résistance d'utilisation R peut être une antenne comme représenté sur la figure 10.

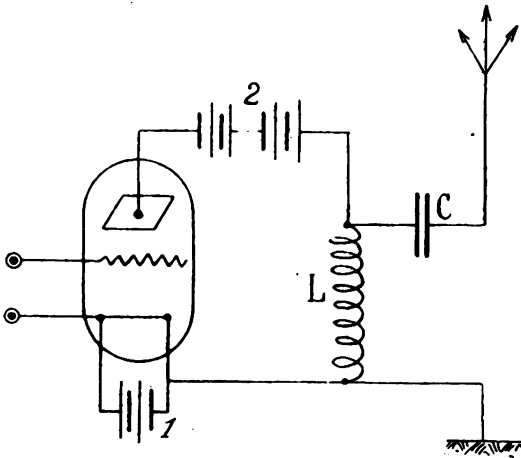


Fig. 10.

» La résistance d'utilisation R peut également être disposée dans la branche de la self. Si cette résistance d'utilisation est une antenne, on disposera comme nous l'avons proposé, une self à fer l pour laisser

passer le courant continu du circuit plaque, tout en opposant une grande impédance au courant à haute fréquence (fig. 11) ⁽¹⁾

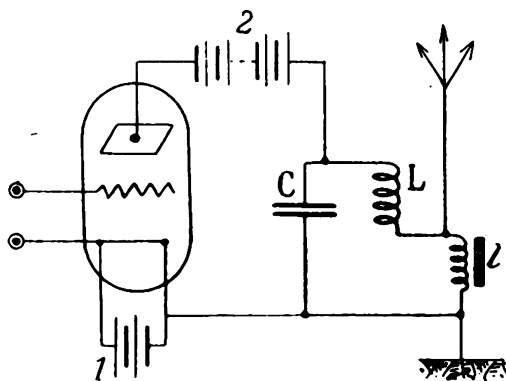


Fig. 11.

» Nous supposons ici que l'on a affaire avec la puissance importante d'un poste d'émission obtenue en amplifiant une puissance plus faible dont le contrôle par un microphone ou autrement est plus facile. La puissance qui contrôle peut être amenée, comme nous l'avons proposé, par un transformateur à circuit magnétique en fer.

* *

» Lorsqu'on veut accroître l'amplification avec des lampes à trois électrodes, on peut suivre deux voies distinctes :

» 1^o On peut se situer dans des conditions de fonctionnement voisines de l'amorçage d'oscillations avec une seule lampe ;

» 2^o On peut utiliser des amplifications successives avec plusieurs lampes et réaliser des amplificateurs dits « à plusieurs étages ».

» Tous les schémas qu'on peut utiliser suivant la première méthode correspondent à des montages suivant lesquels on peut obtenir des oscillations propres ⁽²⁾.

(¹) Nous avons proposé en 1915 les montages d'antenne des figures 10 et 11. Le montage de la figure 10 est anticipé par un brevet Marconi de 1914. C'est celui qui est le plus généralement employé, mais le montage de la figure 11 est aussi intéressant.

(²) Ces montages ont été décrits par Meissner (*Telefunken*) en 1913 et 1914. M. Gutton a imaginé des variantes intéressantes. Dans notre brevet n° 491186 (mai 1915) nous avons décrit expressément le type général d'amplificateur avec lampes à trois électrodes basé sur le principe suivant lequel on se tient près de l'amorçage des oscillations. Mais ce type étant décrit indirectement dans le brevet Meissner n° 467747, l'originalité de notre brevet ne subsiste que pour les montages non dérivés des montages Meissner et pour les montages avec tubes à deux électrodes. Sous cette réserve, l'originalité de notre brevet est absolue.

» La figure 12 dans laquelle on a monté les transformateurs T_1 et T_2 en série à travers la source S et la capacité C représente un de ces montages.

» Les équations du courant I dans la résistance d'utilisation R ,

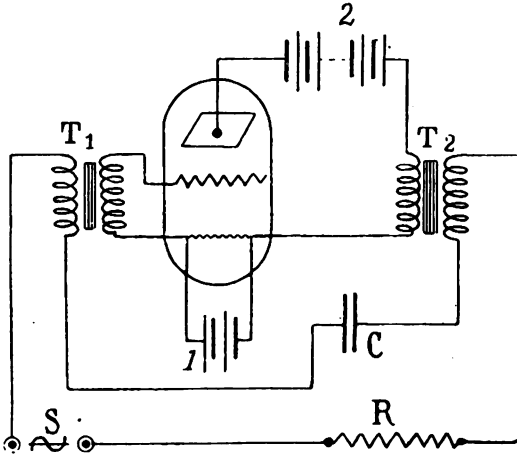


Fig. 12.

du courant j dans le circuit grille et du courant J dans le circuit plaque s'écrivent assez facilement; plus particulièrement, si l'on assimile simplement le tube à un générateur de résistance intérieure R_p siège d'une tension intérieure $kr_g j$. On peut dire que le courant j du circuit grille exerce sur le circuit plaque une action irréversible correspondant à l'apparition dans le circuit plaque de cette tension intérieure $kr_g j$.

» Prenant comme origine des phases celle de la tension $e \sin \omega t$ de la source S , soient I_1, j_1, J_1 les composantes des courants en phase avec $e \sin \omega t$ et I_2, j_2, J_2 les composantes en quadrature.

» Soient, d'autre part, λ, L_g, L_p , les coefficients de self-induction des circuits : résistance R , grille et plaque; et soient M_g et M_p les coefficients d'induction mutuelle des transformateurs T_1 et T_2 . On aura les équations

$$\begin{aligned} RI_1 + \left(\lambda - \frac{1}{C\omega^2} \right) \omega I_2 - M_g \omega j_2 + M_p \omega J_2 &= e, \\ - \left(\lambda - \frac{1}{C\omega^2} \right) I_1 + RI_2 + M_g \omega j_1 - M_p \omega J_1 &= 0, \\ r_g j_1 + L_g \omega j_2 - M_g \omega I_2 &= 0, \\ - L_g \omega j_1 + r_g j_2 + M_g \omega I_1 &= 0, \\ - R_p J_1 - L_p \omega J_2 + M_p \omega I_2 + kr_g j_1 &= 0, \\ L_p \omega J_1 - R_p J_2 - M_p \omega I_1 + kr_g j_2 &= 0. \end{aligned}$$

» Tous les montages susceptibles de donner des oscillations avec des lampes à trois électrodes donneront toujours lieu à un système d'équations de ce genre puisqu'il y aura toujours au moins trois circuits (circuit d'utilisation R , circuit grille, circuit plaque). La simplification que l'on pourra introduire consistera à négliger la puissance en jeu dans le circuit grille-filament et par conséquent la réaction inductive directe du circuit grille sur le circuit d'utilisation R . Dans tous le cas, la résolution de ces équations ne comporte que du travail matériel de calcul. On trouve les conclusions suivantes :

» 1^o Pour une certaine relation entre les constantes λ , C , L_g , L_p , M_g , M_p , il arrive que I_2 s'annule (réactance nulle du système).

» 2^o Pour une certaine relation entre ces mêmes constantes compatible avec la précédente, il peut arriver que I , prenne une valeur infinie c'est-à-dire qu'il y ait par conséquent un effet relais infini. La résistance apparente du circuit d'utilisation devient nulle.

» Si cette résistance apparente devient négative il y a, bien entendu, amorçage d'oscillations spontanées comme nous l'avons remarqué au début de notre étude.

» Physiquement, on doit comprendre l'amplification théoriquement illimitée que peut donner un pareil montage de la façon suivante :

» Imaginons d'abord que la tension e de la source S s'exerce seule, *en supposant inexistante la réaction de la tension grille sur le circuit plaque et toutes ses conséquences*; elle donnera lieu à un courant I dans le circuit de la résistance R , compte étant tenu naturellement des débits par induction sur les résistances R_p et r_g . Le passage de ce courant I entraînera la présence d'une certaine tension u entre la grille et le filament du tube.

» Considérons maintenant uniquement cette tension u supposée existante, et supprimons par la pensée la tension e de la source S . La tension u établissant une tension ku dans le circuit plaque va développer un courant I' dans le circuit de la résistance R à travers la source S .

» Imaginons que I' , par suite des constantes des circuits, soit en phase avec le I considéré précédemment. *On voit tout de suite que I' nous permet de reconstituer I* . Supposons par exemple que I' , nous rende une fraction $\frac{m}{n}$ de I . Il suffira que la source S nous donne une tension réduite $\frac{n-m}{n} e$ pour que le courant correspondant $\frac{n-m}{n} I$

qu'elle produira directement ajouté au courant I' reconstitue effectivement la totalité du courant I .

» Ainsi sans le mécanisme de l'amplification il nous fallait, pour avoir un courant I dans la résistance R , une tension e de la source S ; avec le mécanisme de l'amplification il nous faudra une tension réduite $\frac{n-m}{n}e$ pour avoir ce même courant. Autant dire que, pour une même tension e , le courant I sera multiplié par le facteur $\frac{n}{n-m}$ qui devient infini pour $n = m$.

» On a supposé que I' était en phase avec I , mais pour plus de généralité on peut supposer que I' n'est pas en phase avec I . Exactement on doit dire :

» Le courant qui existe effectivement dans le circuit R et que nous désignons par I est la somme *géométrique* de deux courants, savoir :

» 1° D'un courant I' produit par l'existence de la tension ku , liée à la circulation du courant I ;

» 2° D'un courant I'' produit par la tension e considérée comme agissant isolément.

» Pour disposer d'un courant résultant I , la tension e doit donc être telle qu'elle donne lieu seulement à la différence géométrique I'' de I et de I' . L'amplification obtenue est par suite $\frac{I}{I''}$. Pour qu'il y ait amplification, il suffit que l'on ait $I'' < I$.

» On se rend compte tout de suite qu'ayant établi un montage susceptible de donner des oscillations propres, la menace d'un amorçage intempestif ne permettra pas de se situer dans des conditions trop près de l'amorçage et que l'amplification infinie dont nous avons parlé est purement théorique.

» En fait, à stabilité égale, l'amplification pourra être d'autant plus grande que le tube sera plus puissant, c'est-à-dire aura une émission plus forte.

» Un inconvénient d'un montage tel que celui de la figure 12 est en général d'amplifier différemment suivant la valeur de la fréquence. Le courant I' dont nous avons parlé plus haut peut avoir en effet une phase différente de I et plus ou moins différente suivant la fréquence. Il faut alors non seulement toucher à la valeur de e pour retrouver le courant I , mais aussi à la phase de e . Cependant il est possible de réaliser des montages maintenant l'amplification sur une gamme de fréquences assez étendue.

» Ayant été conduit à parler de l'amorçage des oscillations avec

des lampes à trois électrodes, nous ajouterons quelques mots pour en exposer le mécanisme très simple.

» Le montage le plus fréquent pour la production des oscillations est celui représenté par la figure 13 comportant une self plaque L_p

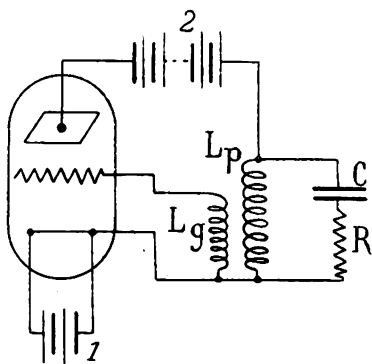


Fig. 13.

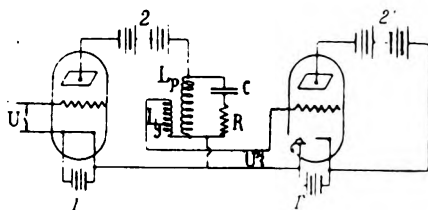


Fig. 14.

et une self grille L_g avec un coefficient d'induction mutuelle M entre elles. Partant de ce montage, imaginons suivant la figure 14 que nous ayons deux lampes identiques et, au lieu d'attaquer avec la self grille le circuit grille-filament de la lampe qui contient le circuit oscillant, attaquons le circuit grille-filament d'une deuxième lampe identique. Appliquons une tension u entre la grille et le filament de la première lampe. Nous développons aussitôt une tension u' entre la grille et le filament de la deuxième lampe. La possibilité de réaliser l'auto-excitation, c'est-à-dire l'amorçage d'oscillations propres avec la première lampe seule est manifestement d'avoir des constantes telles que $u' = u$ (en phase et en grandeur). C'est un raisonnement tout à fait analogue à celui que l'on adopte pour concevoir l'auto-excitation des machines électriques. Nous avons déjà adopté ce point de vue dans notre article de l'*Electrician* de Londres, du 1^{er} décembre 1916. Les conditions mathématiques à réaliser résultent facilement de l'examen des circuits.

» Si l'on considère que la puissance prise par le circuit grille (circuit d'excitation) est faible, on a la possibilité de négliger dans le calcul la réaction du circuit grille sur le circuit plaque. Les conditions d'auto-excitation sont alors les suivantes :

» 1^o Condition d'identité de phase entre u et u' :

$$\frac{L_g \omega}{r_g} = - \frac{R_p}{L_p \omega} \frac{1 - \omega^2 C L_p + \omega^2 C^2 R^2}{1 - \omega^2 C^2 R^2 + \omega C R};$$

» 2° Condition d'égalité entre u et u' :

$$M = -\frac{L_p}{k} - R_p \frac{R_p(1 - \omega^4 C^2 L_p^2 + \omega^2 C^2 R^2) + \omega^4 C^2 L_p^2 R}{\omega^2 L_p(1 - \omega^2 C^2 R^2 + \omega CR)}$$

» Dans l'auto-excitation il faut bien voir que c'est la condition (1) qui joue le rôle essentiel pour déterminer la fréquence $\frac{\omega}{2\pi}$. Une petite capacité intercalée dans le circuit grille et rendant négative la réactance de ce circuit permet de changer notablement cette fréquence.

» M étant donné, la région d'auto-excitation qui s'établit au point de vue du courant, est celui qui donne pour k une valeur moyenne satisfaisant à la condition 2°. k moyen diminue avec l'intensité du courant.

» Si l'on tient compte de la puissance prise par l'excitation (circuit grille), on doit faire intervenir la réaction du circuit grille sur le circuit oscillant et il y a un amortissement supplémentaire qui retarde l'auto-excitation. Il peut même arriver que cette réaction rende l'auto-excitation impossible. Une augmentation excessive de M peut donc, dans certains cas, empêcher l'auto-excitation.

» Une deuxième méthode pour accroître l'amplification consiste à utiliser plusieurs lampes en cascade : c'est ce que représente la figure 15 avec trois lampes.

» Cette disposition ne demande évidemment aucune explication

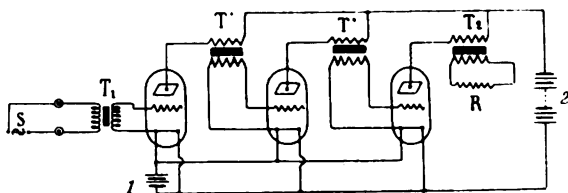


Fig. 15.

complémentaire et l'on voit comment établir le transformateur intercalaire T' d'après ce que nous avons dit plus haut. Ces transformateurs T' ont un rapport η' tel que $\eta' = \sqrt{\frac{r_g}{R_p}}$.

» Dans le système précédent, nous avons vu qu'une limite à l'amplification était imposée par la menace d'un amorçage intempestif. En réalité, il arrive également qu'avec un montage de lampes en cascade, même si l'on prend les plus grandes précautions pour

éviter les réactions entre le circuit plaque et le circuit grille de chaque lampe, il s'établit toujours un couplage suffisant entre l'entrée et la sortie de l'amplificateur pour que l'on soit pratiquement limité dans l'amplification pour des raisons d'amorçage intempestif. Il arrive toujours un moment où des oscillations propres s'amorcent malgré toutes les précautions prises.

» Ces oscillations ont souvent des fréquences hors de proportions avec les capacités et les selfs en jeu et elles correspondent le plus souvent, dans un téléphone, plutôt à des bruits périodiques qu'à des notes musicales.

» Avant de donner une explication détaillée de ce phénomène spécial, nous insisterons sur ce point *capital* qui ne semble pas avoir encore été mis en lumière, à savoir qu'un amplificateur tel que celui de la figure 15 peut être non seulement un amplificateur de puissance wattée, mais aussi *un amplificateur de puissance magnétisante ou réactive*.

» Dans un pareil système, si l'on admet une réaction quelconque entre l'entrée et la sortie, il n'est donc pas théoriquement vrai que l'on ne puisse pas produire des déphasages en avant sans l'intervention de capacités, comme il est bien connu pour les systèmes de circuits ordinaires ⁽¹⁾, et le principe de la conservation de la puissance réactive de M. Boucherot ne s'applique plus.

» L'auto-excitation y devient par suite concevable même avec des circuits dépourvus de la capacité nécessaire pour contre-balancer l'effet des selfs; elle y devient concevable également avec des circuits dépourvus de self et seulement pourvus de capacité.

» La capacité ou la self n'y restent nécessaires que sous une valeur très réduite, uniquement pour assurer quelque stabilité aux amorçages. En fait nous avons réalisé des amplificateurs qui permettent de réaliser des selfs négatives avec des selfs positives, des capacités négatives (selfs) avec des capacités positives.

» Nous reviendrons sur cette importante question en étudiant les conditions d'amorçage des oscillations dans les appareils à plusieurs lampes.

» Nous verrons comment les moindres capacités dans les circuits grilles ont une répercussion considérable sur la fréquence des oscillations. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Latour.

⁽¹⁾ Voir notre article paru dans la *Lumière électrique*, avril 1907, page 5 : *Sur quelques théorèmes généraux relatifs à l'Électrotechnique*.

REMARQUES SUR LES CARACTÉRISTIQUES D'ALTERNATEURS.

Étude des caractéristiques d'alternateur en courant complètement réactif.

M. DOLIGEZ. — « Nous adopterons dans cette étude les notations de Potier. Le coefficient α représente le rapport d'équivalence entre les ampères-tours inducteurs et les ampères-tours induits. Le coefficient λ représente la réactance de fuite de l'induit. Dans ces conditions, si $E = \varphi(J)$ est l'équation de la caractéristique à vide de l'alternateur, on sait que l'on a, en courant entièrement réactif,

$$(1) \quad U = \varphi(J - \alpha I) - \lambda I \quad \text{pour} \quad \hat{\varphi} = + \frac{\pi}{2}.$$

Cette équation représente la surface caractéristique de l'alternateur. Rapportons-la à trois axes rectangulaires OU, OJ, OI. Coupons cette surface par des plans parallèles d'équation $U + \lambda I = p$, p étant le paramètre variable. L'intersection a pour équation

$$U + \lambda I = p, \quad \varphi(J - \alpha I) = p.$$

$\varphi(J - \alpha I) = p$ a une solution unique d'après la forme de la courbe

$$U = \varphi(J);$$

soit q cette solution telle que $\varphi(q) = p$. La courbe d'intersection a pour équation $U + \lambda I = p$, $J - \alpha I = q$. C'est l'équation d'une droite qui se déplace parallèlement à elle-même lorsque p varie. Son point d'intersection avec le plan UJ est donné par $U = p$, $J = q$. Comme $p = \varphi(q)$, ce point se trouve sur la caractéristique à vide.

» Les cosinus directeurs de cette droite sont :

Avec l'axe OJ,

$$\cos \hat{j} = + \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \lambda^2 + 1}};$$

Avec l'axe OU,

$$\cos \hat{u} = - \frac{\lambda}{\sqrt{\alpha^2 + \lambda^2 + 1}};$$

Avec l'axe OI,

$$\cos \hat{i} = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \lambda^2 + 1}}.$$

» Donc : Pour $\cos \varphi = 0$, la caractéristique dans l'espace d'un alternateur est un cylindre ayant comme directrice la caractéristique

à vide et comme génératrice la droite de cosinus directeurs :

$$\cos \hat{j} = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \lambda^2 + 1}}, \quad \cos \hat{u} = \frac{-\lambda}{\sqrt{\alpha^2 + \lambda^2 + 1}}, \quad \cos \hat{i} = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \lambda^2 + 1}}.$$

» Étudions les trois cas suivants :

$$I = \text{const.}, \quad U = \text{const.}, \quad J = \text{const.}$$

» 1^o $I = \text{const.}$ — Pour $I = 0$, l'équation (1) devient $U = \varphi(I)$;

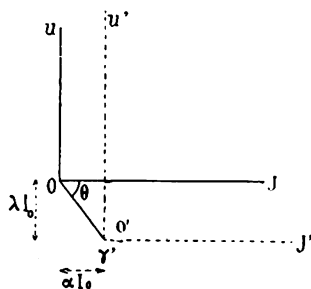
» Pour $I = I_0$, l'équation (1) devient $U + \lambda I_0 = \varphi(J - \alpha I_0)$.

» Faisons un changement d'origine et posons $U' = U + \lambda I_0$, $J' = J - \alpha I_0$.

» Les deux équations précédentes deviennent $U = \varphi(J)$ et $U' = \varphi(J')$. Ce sont les équations de deux courbes identiques qui se déduisent l'une de l'autre par translation. La figure montre que la longueur de la translation est $OO' = I_0 \sqrt{\alpha^2 + \lambda^2}$, et que la direction fait avec OJ un angle θ tel que $\tan \theta = \frac{\lambda}{\alpha}$; c'est le résultat bien connu du théorème de Potier.

» 2^o $U = \text{const.}$ — Pour $U = 0$ l'équation (1) devient

$$\varphi(J - \alpha I) = \lambda I \quad (\text{caractéristique en court circuit}).$$



» Pour $U = U_1$ l'équation (1) devient

$$\varphi(J - \alpha I) = U_1 + \lambda I.$$

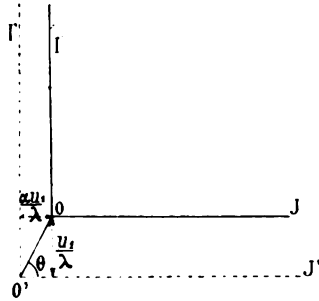
Faisons un changement d'origine et posons pour cette dernière équation

$$I' = \frac{U_1}{\lambda} + I, \quad J' = \alpha \frac{U_1}{\lambda} + J.$$

» Les deux équations précédentes deviennent :

$$\varphi(J - \alpha I) = \lambda I, \quad \varphi(J' - \alpha I') = \lambda I'.$$

Ce sont encore deux courbes identiques se déduisant l'une de l'autre par translation.



» La longueur de la translation est

$$OO' = \frac{U_1}{\lambda} \sqrt{1 + \alpha^2};$$

sa direction est donnée par

$$\tan \theta = \frac{1}{\alpha}$$

Donc la courbe correspondant à $U = U_1$ se déduit de la caractéristique en court circuit par une simple translation.

» 3° $J = \text{const.}$ — Pour $J = J_0$, l'équation (1) devient

$$\varphi(J_0 - \alpha I) = U + \lambda I;$$

» Pour $J = J_1$, l'équation (1) devient

$$\varphi(J_1 - \alpha I) = U + \lambda I.$$

» On fait comme précédemment un changement d'origine en posant

$$U' = U + \frac{\lambda}{\alpha} (J_1 - J_0), \quad I' = I + \frac{J_0 - J_1}{\alpha}.$$

» La deuxième équation en J_1 devient

$$\varphi(J_0 - \alpha I') = U' + \lambda I'.$$

Les deux courbes correspondant à J_0 et J_1 se déduisent l'une de l'autre par une translation.

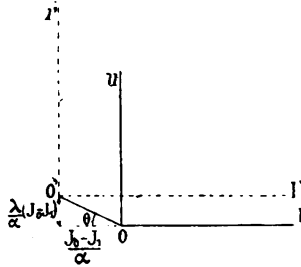
» Longueur de translation

$$OO' = \frac{J_0 - J_1}{\alpha} \sqrt{1 + \lambda^2}.$$

» Direction

$$\tan \theta = \lambda.$$

» Le théorème de Potier est donc général et le parallélisme des



caractéristiques en fonctionnement réactif se retrouve pour les caractéristiques à tension constante et pour les caractéristiques à excitation constante.

» *Remarque I.* — Lorsque $\varphi = -\frac{\pi}{2}$, il suffit de changer α en $-\alpha$ dans les résultats précédents.

» La surface caractéristique est un cylindre ayant comme directrice la caractéristique à vide et comme génératrice une droite dont les cosinus directeurs sont

$$\cos \lambda = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \lambda^2 + 1}}, \quad \cos u = \frac{-\lambda}{\sqrt{\alpha^2 + \lambda^2 + 1}}, \quad \cos I = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \lambda^2 + 1}}.$$

» *Remarque II.* — On peut démontrer directement le parallélisme des caractéristiques à tension constante et à excitation constante sans passer par la surface caractéristique. Mais ces démonstrations sont plus laborieuses.

Étude des caractéristiques en charge des alternateurs.

» Nous avons démontré que la surface caractéristique d'un alternateur en courant réactif était un cylindre d'équation $f(U, I, J) = 0$. Nous nous proposons maintenant de déterminer la surface caractéristique en charge pour une différence de phase donnée

$$f(U, I, J, \varphi) = 0 \quad \text{pour} \quad \varphi = \text{const.}$$

» Nous exposerons tout d'abord un procédé nouveau de pré-détermination des caractéristiques en charge.

» *Prédétermination des caractéristiques en charge.* — Nous supposons connus la caractéristique à vide de l'alternateur et les coefficients λ et α de Potier.

» L'équation générale du fonctionnement de l'alternateur est

$$(1) \quad E = U + RI + L \frac{dI}{dt}.$$

E représente la force électromotrice qui à vide correspondrait au courant d'induction considéré. L est la self totale de l'induit.

» On peut encore écrire

$$(2) \quad e = U + RI + l \frac{dI}{dt}.$$

e représente la force électromotrice réelle de l'alternateur correspondant au flux résultant de l'action des inducteurs et de l'induit. l est le coefficient de self de fuite de l'induit. On a $\lambda = l\omega$.

» Géométriquement nous pouvons construire e pour un déphasage donné, à l'aide du diagramme habituel OABC :

$$OA = U, \quad AB = RI, \quad BC = \lambda I, \quad OC = e.$$

Il s'agit de déterminer J , courant d'induction correspondant à U , i , φ donnés.

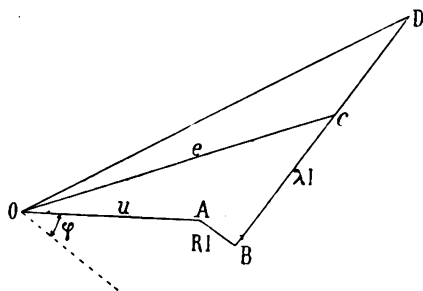


Fig. 1.

» L'équation générale (1) s'écrit géométriquement

$$E = U + RI + L\omega I.$$

L correspond à une certaine saturation. La saturation est fonction du flux réel qui traverse le circuit magnétique, c'est-à-dire du flux résultant de l'action des inducteurs et de l'induit. Ce flux crée une force électromotrice réelle égale à e que nous avons déterminée en OC. Donc à chaque valeur de OC correspond une valeur déterminée

d'où

$$L\omega = \frac{E'}{I_{cc}} = \frac{C'D'}{I_{cc}} = \frac{C'E'}{I_{cc}} + \frac{E'D'}{I_{cc}}.$$

Or

$$C'E' = A'B' = \lambda I_{cc}.$$

En posant

$$m_1 = \tan \widehat{E'B'D'},$$

$$D'E' = m_1 E'B' = m_1 A'C' = m_1 \alpha I_{cc},$$

d'où

$$L\omega = \lambda + m_1 \alpha.$$

» Sur le diagramme précédemment considéré portons $CD = m_1 \alpha I$, nous aurons

$$OD = U + RI + (\lambda + m_1 \alpha) I = U + RI' + L\omega I \text{ (géométriquement).}$$

Donc

$$OD = E.$$

Sur la caractéristique à vide, portons

$$G'F' = OD,$$

nous aurons

$$O'F' = J \text{ cherché.}$$

» *Remarque I.* — La détermination de $CO = m_1 \alpha I$ se fait très simplement. Portons sur la figure 2

$$A'K' = BC = \lambda I.$$

On voit aisément sur la figure que

$$E'M' = C'L' = H'L' \cos \theta = \lambda I \frac{\alpha}{\lambda} = \alpha I.$$

Donc

$$E'N' = m_1 \alpha I.$$

» *Remarque II.* — Le coefficient τ du diagramme de M. Blondel est égal à $m_1 \alpha$.

» *Remarque III.* — Soient Q et R (*fig. 2*) les points limitant le genou de la caractéristique à vide. Construisons Q' comme l'indique la figure.

» Lorsque le point B' se trouve entre O' et Q', $m_1 = k = \text{const.}$, k étant le coefficient angulaire de la partie rectiligne de la caractéristique.

» Lorsque B' est au delà de R, $m_1 = m = \text{const.}$, m étant le

coefficient angulaire de la droite RD' en laquelle se confond approximativement la caractéristique.

» Entre les points Q' et R le coefficient m_1 est variable et dépend de U, I, φ .

» *Remarque IV.* — Cette construction donne sensiblement les mêmes résultats que la construction classique de Potier. Pour la partie rectiligne de la caractéristique correspondant à la non-saturation, les deux méthodes sont identiques. Pour les parties saturées, la construction indiquée donne des valeurs de J un peu inférieures à celles de Potier, mais néanmoins très voisines. Ceci se démontre facilement sur le diagramme.

» *Remarque V.* — Cette construction permet d'expliquer l'anomalie si souvent constatée sur les caractéristiques en charge de

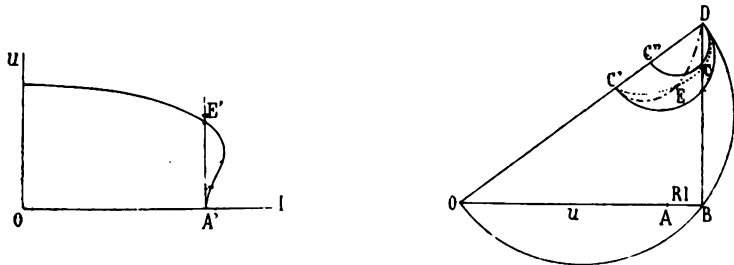


Fig. 2 bis.

certain alternateurs peu saturés fonctionnant en courant actif sous excitation constante. On constate pour certaines valeurs de la résistance du circuit un courant plus grand que le courant de court circuit.

» Dans ce cas, $\cos \varphi = 1$ et le diagramme se réduit à un triangle rectangle. Puisque l'excitation est constante OD est constant et B se déplace sur un cercle de diamètre OD . Si m_1 était constant le rapport $\frac{\lambda}{m_1 \alpha}$ le serait aussi et le point C décrirait un cercle de diamètre $C'D$

$$\frac{OC'}{C'D} = \frac{\lambda}{m_1 \alpha}.$$

Mais quand U augmente, OC augmente et d'après notre construction m_1 diminue. Le lieu de C sera donc intérieur au cercle de diamètre $C'D$ et extérieur au cercle correspondant à la plus petite valeur de m_1 et de diamètre $C''D$. En toute rigueur le rapport $\frac{\lambda}{m_1 \alpha}$

est une fonction de U : $\frac{\lambda}{m_1 \alpha} = f(U)$. En posant $\frac{\lambda}{m_1 \alpha} = a + bU$, on verrait par un raisonnement analytique simple que la droite OD n'est pas normale en C' au lieu de C. Nous avons figuré en pointillé sur la figure 2 bis le lieu de C.

» Si d'autre part I restait constant, BC serait constant et le point C décrirait une branche de limaçon de Pascal figurée en traits mixtes sur la figure. On voit que le lieu de C et le limaçon de Pascal se coupent en un point E. De C' en E le courant I est supérieur au courant de court circuit; de E à D, il est inférieur. Au point E correspond le point E' de la caractéristique. La position de E dépend évidemment de la forme de la fonction $\frac{\lambda}{m_1 \alpha} = f(U)$.

Interprétation analytique des résultats précédents.

» 1° ALTERNATEUR PEU SATURÉ. — Dans ce cas $m_1 = k$. On ne considère que la partie rectiligne de la caractéristique à vide. On a donc (fig. 3)

$$\begin{aligned} OD &= kJ, \\ OE &= k(J - \alpha I \sin \psi'), \\ CE &= k\alpha I \cos \psi'. \end{aligned}$$

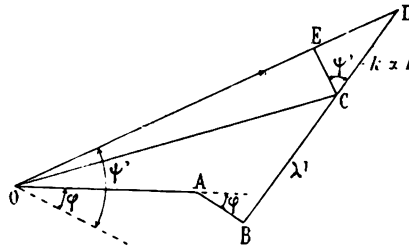


Fig. 3.

En projetant le contour OABCE sur OE, nous aurons

$$(1) \quad OE = k(J - \alpha I \sin \psi') = U \cos(\psi' - \varphi) + RI \cos \psi' + \lambda I \sin \psi'.$$

» Projetons le même contour sur CE,

$$(2) \quad CE = k\alpha I \cos \psi' = U \sin(\psi' - \varphi) + R \sin \psi' - \lambda I \cos \psi'.$$

En développant

$$(1') \quad kJ = \sin \psi' (k\alpha I + \lambda I + U \sin \varphi) + \cos \psi' (RI + U \cos \varphi),$$

$$(2') \quad 0 = \sin \psi' (RI + U \cos \varphi) - \cos \psi' (k\alpha I + \lambda I + U \sin \varphi).$$

Élevons au carré et ajoutons membre à membre il vient

$$(3) \quad k^2 J^2 = [k\alpha I - \lambda I + U \sin \varphi]^2 + [RI + U \cos \varphi]^2.$$

Telle est l'équation générale reliant U , I , J , φ .

» *Cône caractéristique.* — Pour chaque valeur de φ l'équation (3) représente un cône ayant son sommet à l'origine et pour plan de symétrie le plan UOI . Discutons ce cône.

» *a. Sections parallèles au plan de coordonnées UI .* — Ce sont les courbes caractéristiques à excitation constante. Pour $J = J_1$, on a

$$k^2 J_1^2 = [k\alpha I + \lambda I + U \sin \varphi]^2 + [RI + U \cos \varphi]^2.$$

C'est l'équation d'une ellipse. Si φ est constant pour deux valeurs J_1 et J_2 de l'excitation, on obtient deux ellipses homothétiques dans le rapport $\frac{J_1}{J_2}$.

» Ces ellipses coupent les axes en des points fixes A et B (fig. 4)

$$OA = \frac{kJ_1}{\sqrt{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}},$$

$$OB = kJ_1,$$

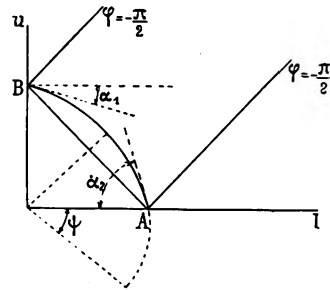


Fig. 4.

avec

$$\tan \alpha_1 = - \left(\frac{dU}{dI} \right)_{I=0} = (\lambda + k\alpha) \sin \varphi + R \cos \varphi,$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}{(\lambda + k\alpha) \sin \varphi + R \cos \varphi}.$$

$\tan \alpha_1$ est maximum pour $\tan \varphi = \frac{\lambda + k\alpha}{R}$. La partie utile de l'ellipse se réduit à la droite AB.

» Pour $\varphi = \frac{\pi}{2}$, on a

$$k^2 J_1^2 = [(k\alpha + \lambda)I + U]^2 + R^2 I^2.$$

Si R est négligeable on retombe sur le cas précédent.

» Pour $\varphi = 0$,

$$k^2 J_1^2 = (\lambda + k\alpha)^2 I^2 + (U + RI)^2,$$

$$\tan \alpha_1 = R.$$

Si R est négligeable les axes principaux de l'ellipse sont très voisins des axes de coordonnées.

» Pour $\varphi = -\frac{\pi}{2}$

$$k^2 J_1^2 = [(\lambda + k\alpha)I - U]^2 + R^2 I^2.$$

L'ellipse se réduit à deux droites si R est négligeable.

» D'une façon générale les axes principaux de l'ellipse sont avec OI un angle χ déterminé par

$$\tan 2\chi = -2 \frac{(\lambda + k\alpha) \sin \varphi + R \cos \varphi}{(\lambda + k\alpha)^2 + R^2 - 1}.$$

» *b. Sections parallèles au plan UJ .* — Ce sont les courbes caractéristiques à courant constant. L'équation générale devient

$$U^2 - k^2 J^2 + 2 I_1 [(k\alpha + \lambda) \sin \varphi + R \cos \varphi] U + I_1^2 [R^2 + (\lambda + k\alpha)^2] = 0.$$

» Pour $\varphi = \text{const.}$ c'est l'équation d'une hyperbole dont le centre se trouve sur l'axe OU . Lorsque φ varie, on a une famille d'hyperboles. Elles passent toutes par le point fixe A de coordonnées (fig. 5)

$$U = 0, \quad J = \frac{I_1}{k} \sqrt{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}.$$

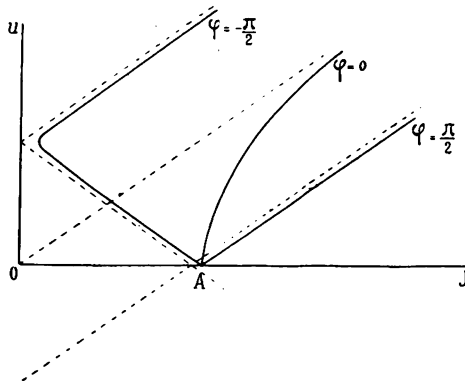


Fig. 5.

Les directions asymptotiques sont

$$U = \pm kJ.$$

Elles sont indépendantes de φ et de I , et parallèles à la caractéristique à vide. Les asymptotes sont

$$U = \pm kJ - I_1 [(\lambda - k\alpha) \sin \varphi + R \cos \varphi].$$

Pour $\varphi = \frac{\pi}{2}$ l'asymptote devient $U = kJ - I, (\lambda + k\alpha)$. Si R est négligeable cette asymptote passe par A. La courbe caractéristique est une droite.

» Pour $\varphi = 0$ l'asymptote devient $U = kJ - RI$. Si R est négligeable, l'hyperbole a son sommet en A, son centre en O.

» Pour $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ l'asymptote devient

$$U = kJ + (\lambda + k\alpha)I.$$

Si R est négligeable, la courbe se confond avec ses deux asymptotes.

» c. *Sections parallèles à IJ.* — Ce sont les caractéristiques à tension constante. Ces sections sont des hyperboles

$$I^2[R^2 + (\lambda + k\alpha)^2] - k^2 J^2 + 2U_1[(\lambda + k\alpha)\sin\varphi + R\cos\varphi]I + U_1^2 = 0.$$

Lorsque φ varie on obtient une famille d'hyperboles dont les centres

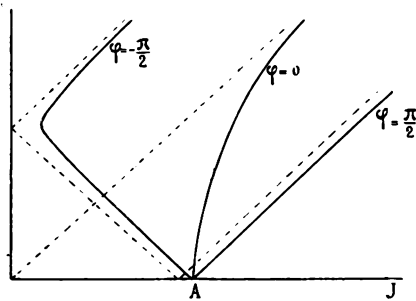


Fig. 6.

se trouvent sur l'axe des I . Ces hyperboles passent par le point fixe A (fig. 6) de coordonnées

$$I = 0, \quad J = \frac{U_1}{k}.$$

» Les directions asymptotiques sont

$$J = \pm I \frac{\sqrt{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}}{k}.$$

Elles sont indépendantes de φ et U_1 et parallèles à la caractéristique en court circuit. Les asymptotes sont

$$\pm J = I \frac{\sqrt{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}}{k} + \frac{U_1}{k} \frac{(\lambda + k\alpha)\sin\varphi + R\cos\varphi}{\sqrt{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}}.$$

Le centre a pour coordonnées

$$J = 0, \quad I = -U_1 \frac{(\lambda + k\alpha) \sin \varphi + R \cos \varphi}{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}.$$

» Pour $\varphi = \frac{\pi}{2}$ l'ordonnée du centre est

$$I = -U_1 \frac{\lambda + k\alpha}{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}.$$

Si R est négligeable, l'hyperbole se confond avec son asymptote.

» Pour $\varphi = 0$ l'ordonnée du centre est

$$I = -U_1 \frac{R}{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}.$$

Si R est négligeable, le centre est en O, le sommet de l'hyperbole est en A.

» Pour $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ l'ordonnée du centre est

$$= +U_1 \frac{\lambda + k\alpha}{R^2 + (\lambda + k\alpha)^2}.$$

Si R est négligeable, l'hyperbole se confond avec ses deux asymptotes.

» 2° ALTERNATEUR SATURÉ. — Le point caractéristique B' (fig. 2) se trouve dans ce cas au delà du point R sur la partie rectiligne de la caractéristique à vide. Soit $E = A + mJ$ l'équation de cette partie rectiligne de la caractéristique.

» Reportons-nous au diagramme de la figure 3. On a

$$OD = A + mJ, \quad OE = A + m(J - \alpha I \sin \psi'), \quad CE = m\alpha I \cos \psi'.$$

Les équations (1) et (2) deviennent

$$\begin{aligned} A + m(J - \alpha I \sin \psi') &= U \cos(\psi' - \varphi) + RI \cos \psi' + \lambda I \sin \psi', \\ m\alpha I \cos \psi' &= U \sin(\psi' - \varphi) + RI \sin \psi' - \lambda I \cos \psi', \end{aligned}$$

qui s'écrivent

$$\begin{aligned} A + mJ &= \sin \psi' [m\alpha I + \lambda I + U \sin \varphi] + \cos \psi' [RI + U \cos \varphi], \\ 0 &= \sin \psi' [RI + U \cos \varphi] - \cos \psi' [m\alpha I + \lambda I + U \sin \varphi]. \end{aligned}$$

D'où, en élevant au carré et ajoutant,

$$(3') \quad (A + mJ)^2 = [m\alpha I + \lambda I + U \sin \varphi]^2 + [RI + U \cos \varphi]^2.$$

Cette équation représente un cône ayant son sommet au point

$A + mJ = 0$. On peut facilement discuter ce cône de la même façon que précédemment.

» Les plans parallèles à UI (caractéristiques à excitation constante) donnent des ellipses ayant pour centre l'origine et homothétiques entre elles pour la même valeur de φ .

» Les plans parallèles à JU (caractéristiques à courant constant) ou à JI (caractéristiques à tension constante) donnent des hyperboles. Mais les centres de ces hyperboles ne sont plus sur la droite $J = 0$, mais sur la droite $J = -\frac{A}{m}$.

Conclusion.

» La surface caractéristique $f(U, I, J, \varphi) = 0$ pour un φ donné se compose de deux cônes ayant l'axe OJ comme axe de symétrie. L'un de ces cônes a son sommet en O, l'autre au point $J = -\frac{A}{m}$.

Ces deux cônes sont réunis par une surface d'un degré supérieur dont l'équation dépend de l'équation mal définie de la caractéristique à vide dans sa partie courbe. Cette surface caractéristique se déforme avec $\cos \varphi$.

» Sa trace sur le plan $I = 0$ reste constamment la caractéristique à vide. Sa trace sur le plan $U = 0$ reste la caractéristique en court circuit.

» Pour $\varphi = \frac{\pi}{2}$ cette surface est cylindrique comme nous l'avons montré dans la première partie. La caractéristique en court circuit n'est autre chose que la projection de la caractéristique à vide.

» Quand φ décroît de $\frac{\pi}{2}$ à $-\frac{\pi}{2}$ la convexité de cette surface augmente constamment. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Doligez.



CORRESPONDANCE.

A Monsieur Mazen, président de la Société française des Électriciens.

MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

L'intérêt que présente la théorie de l'accumulateur au plomb m'engage à répondre de nouveau à la lettre de M. Féry du 24 mars dernier.

C'est par suite d'une confusion, de peu d'importance d'ailleurs, que M. Féry signale les expériences que j'aurais faites sur ce sujet à son laboratoire; elles ont été faites de 1903 à 1906 partie dans mon laboratoire de l'École de Physique et de Chimie et partie à la fabrique d'accumulateurs que je dirigeais à cette époque.

Il me semble résulter de la nouvelle expérience citée par M. Féry sur la décharge d'une négative, que l'hypothèse de la formation du sous-sulfate de plomb $\text{SO}^4 \text{Pb}^2$ trouve un appui dans le fait du changement brusque de la couche coïncidant avec le changement apparent de la couleur de la plaque.

Néanmoins il faut considérer que la présence du sulfate de plomb dans la solution est indispensable au fonctionnement de l'accumulateur; à l'appui de cette affirmation, voici les principaux faits facilement contrôlables :

1° Il n'est pas possible de décharger des plaques d'accumulateurs dans une solution sulfurique ne contenant pas de $\text{SO}^4 \text{Pb}$.

2° Il suffit d'ajouter à la solution du sulfate de plomb pour rendre la décharge possible.

3° La diminution du rendement d'un accumulateur avec la rapidité de la décharge est rendue d'autant plus facile qu'on augmente la solubilité du sulfate de plomb dans l'électrolyte par adjonction de sulfate de soude et de magnésie.

4° Les prises d'échantillons faites sur l'électrolyte, pendant le fonctionnement de l'élément, montrent qu'il y a appauvrissement de l'électrolyte en sulfate de plomb pendant la charge au voisinage de la positive.

Le sulfate de plomb que M. Féry reconnaît exister dans l'électrolyte, étant décomposé par le courant tant à la charge qu'à la décharge, doit se renouveler dans la solution puisqu'il est nécessaire à la décharge et il faut, par suite, que ce sulfate de plomb soit fourni par les électrodes.

Pour que l'hypothèse de la formation du sous-sulfate $\text{SO}^4 \text{Pb}^2$ soit compatible avec les faits ci-dessus, il est donc nécessaire que ce sel soit décomposable en $\text{SO}^4 \text{Pb}$ et Pb par le seul fait de sa dissolution dans l'électrolyte.

Consultés au sujet des propriétés chimiques probables de ce sous-sulfate de plomb qu'il semble à peu près impossible d'isoler, MM. Copaux et Darzens ont émis l'opinion que l'existence de ce corps est très probable, mais qu'il doit être d'une très grande instabilité et que, en particulier, la dissolution doit le faire passer à l'état beaucoup plus stable de $\text{SO}^4 \text{Pb}$ et Pb.

Dans ces conditions, je crois que l'hypothèse de M. Féry de la formation du sous-sulfate de plomb peut s'accorder assez complètement avec l'expérience et j'espère que cette discussion un peu longue n'aura pas été tout à fait inutile si elle a éclairci un peu un point que la Communication de M. Féry avait laissé dans l'ombre.

Veuillez agréer, Monsieur le Président, l'assurance de ma considération très distinguée.

Paul BARY.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Distribution du flux magnétique dans les tôles d'acier annulaires, par A.-E. KENNELLY et P.-L. ALGER (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, décembre 1917).

Les auteurs étudient la variation radiale de la densité du flux magnétique dans une tôle d'acier circulaire soumise à une force magnétomotrice circonférentielle provenant d'un enroulement toroïdal. Un noyau feuilleté fut construit au moyen de 25 anneaux découpés dans de l'acier à forte teneur de silicium, isolés entre eux par des feuilles de papier. Des petits trous furent percés dans le noyau suivant une ligne diamétrale et perpendiculairement à son plan, de manière à diviser ce noyau, radialement, en trois zones annulaires concentriques d'à peu près même section transversale. Dans chacune des zones, le flux magnétique put être déterminé séparément, à l'aide d'enroulements appropriés passant à travers les trous, et aussi à l'aide d'oscillogrammes donnant les formes d'ondes des tensions induites. Les résultats des essais obtenus, par application, à l'enroulement primaire réparti autour du noyau, de forces électromotrices sinusoïdales aux fréquences de 60, 340 et 696 périodes par seconde, sont présentés sous forme de tableaux et de courbes.

Ces résultats accusent, pour les trois zones du noyau, des différences marquées dans les densités de flux, et cela doit être attribué, en majeure partie, aux variations de la perméabilité avec celles du champ magnétique aux divers rayons de zones, l'écran magnétique latéral étant relativement faible. Pour de faibles densités de flux, la différence est particulièrement marquée, et pour les fréquences élevées, elle se complique de l'effet Kelvin (*skin effect*). Si le flux total dans les tôles est sinusoïdal, les flux de zone individuels n'ont pas le même caractère. Le flux de la zone externe est, en général, celui dont la forme d'onde présente le plus de déformation. On peut définir la déformation de la densité de flux comme étant la différence entre les densités de flux interne et externe divisée par la densité de flux au rayon géométrique moyen ; alors cette valeur, pour de faibles densités, est d'environ 0,68. La valeur de la déformation de la densité de flux dépend du rapport entre la largeur de la tôle et le rayon géométrique moyen. Plus ce rapport est faible, moindre est la déformation.

Essais de couronne à haute altitude, par B.-F. JAKOBSEN (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, décembre 1917).

Ces essais eurent lieu au Pérou, sur une ligne de transport d'énergie de 110 km, à une altitude moyenne de 4115 m, et à des tensions variant entre 40 000 et 72 000 volts. La ligne comprenait deux circuits triphasés, avec, pour chaque circuit, deux transpositions complètes. Les pertes par couronne furent obtenues en retranchant des pertes totales, mesurées, les pertes dans le noyau et le cuivre des transformateurs ainsi que les pertes en ligne

dues aux courants de charge. Les méthodes par lesquelles on détermina ces pertes sont décrites en détail. Les résultats obtenus d'après ces méthodes figurent ci-dessous, en regard des chiffres obtenus par les calculs basés sur la loi de Peek.

Tension de la ligne en kilovolts.	Pertes par couronne en kilowatts		Rapport.
	d'après la loi de Peek.	d'après essais de Jacobsen.	
50,5	0	6,0	»
64	22	9,6	2,29
58	100	17,5	5,72
62	236	31,5	7,49
66	428	57,5	8,31
70	678	105,5	6,42
72,3	848	153,0	5,54

De ces chiffres il résulte qu'il y a un écart considérable entre les résultats obtenus par la méthode de l'auteur et ceux calculés d'après la loi de Peek, écart s'élevant, en un cas, à 800 pour 100. Par contre, il y a accord très satisfaisant avec les résultats obtenus par Faccioli sur la ligne Shoshone-Leadville. Cela semble indiquer que, pour l'ordre de grandeur des tensions considérées, la courbe de perte de tension est logarithmique, et non quadratique. D'autre part, une Note de Ryan, accompagnant le Mémoire, établit une comparaison avec la formule de ce dernier auteur; dans ce cas, les résultats obtenus sont peu divergents. De fait, les pertes dues à la couronne, sur la ligne considérée, ont été trouvées moindres que celles prévues, et cela met en cause, jusqu'à un certain point, l'influence de la dimension du fil, dimension dont le choix est par conséquent d'importance pratique. Il fut également procédé à des essais par temps de pluie, mais il n'y eut pas de différence appréciable avec les résultats obtenus par beau temps.

Carte en relief de la charge annuelle ; Analyse de la charge de pointe et du facteur de charge, par W. LE ROY ROBERTSON (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, décembre 1917).

L'auteur expose en détail une méthode de représentation visuelle de la charge annuelle totale des stations centrales, méthode consistant à découper sur des cartons les courbes de charge quotidiennes, puis à réunir en faisceau les divers cartons, placés verticalement par ordre de date. Des vues photographiques de tels faisceaux, constituant de véritables cartes en relief, sont reproduites dans le Mémoire. Ce procédé met excellemment en évidence l'effet de l'avance de l'heure sur la charge (heure d'été). De plus, les pointes extrêmes et les creux profonds de la charge ressortent beaucoup mieux que sur les courbes journalières tracées sur le papier. La carte en relief permet aussi de calculer les facteurs de charge annuels, pour des sections déterminées de cette carte, et d'en tirer profit pour la meilleure utilisation du matériel des centrales. L'auteur signale que M. H.-A. Barre, de la Pacific Light and Power Corporation, de Los Angeles (Californie), a eu recours à une carte similaire, notamment pour faire ressortir aux yeux des financiers les valeurs respectives des installations à vapeur et hydro-électriques.

Le « Secomor » ou dispositif mécanique pour déterminer les caractéristiques d'un moteur polyphasé série à collecteur, par V. KARAPETOFF (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, février 1918).

Le « Secomor » (abréviation de « series commutator motor ») est une combinaison de barreaux mobiles et réglables, pouvant s'ajuster de manière à représenter le diagramme-vecteur des tensions, des intensités, des forces magnétomotrices et des flux d'un moteur du type mentionné ci-dessus, et ce, pour toutes constantes désirées. L'auteur donne la théorie du moteur considéré et indique comment le système d'articulations peut être construit pour l'obtention des caractéristiques sous diverses conditions de charges. L'emploi de ce système permet au dessinateur de choisir les meilleures constantes électriques, dans un but donné, sans avoir à tracer des diagrammes vectoriels compliqués, ni recourir à une théorie analytique plus ou moins confuse. Grâce à cet instrument, on peut tracer mécaniquement des courbes relatives au courant, au couple moteur, à la vitesse, à l'énergie absorbée, à l'effet utile, au rendement, au facteur de puissance, enfin au courant magnétisant. Les facteurs que l'on peut faire varier, par le réglage de l'appareil, sont : le rapport entre les ampères-tours primaires et secondaires, leur rapport avec la force magnétomotrice d'excitation, l'angle de décalage des balais, les chutes ohmique et réactive, la saturation du fer, les pertes dans le noyau et le frottement, enfin la réaction des ampères-tours de court circuit sur le courant d'excitation. Un dispositif mécanique additionnel permet de tenir compte de la chute d'impédance dans le moteur. Ce dispositif comporte, entre autres organes, un fil plié à la forme de la vraie courbe de saturation du fer.

Régime et choix des interrupteurs à huile, par E.-M. HEWLETT, J.-M. MAHONEY et G.-A. BURNHAM (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, février 1918).

Vu les conditions variables des systèmes de distribution où sont employés les interrupteurs ou disjoncteurs, il est impossible de formuler une règle simple concernant le choix de ces appareils, pour tous les cas qui se présentent. Les auteurs discutent les interprétations des Règles de normalisation de l'A. I. E. E., relatives au régime des interrupteurs à huile, et ils considèrent les facteurs variables qui sont impliqués dans le choix des appareils, pour divers systèmes de distribution. Ils suggèrent une méthode d'après laquelle les caractéristiques de court circuit des divers systèmes peuvent servir à déterminer le choix convenable des interrupteurs à huile, du moins pour les systèmes de moyenne importance. Mais la méthode n'est pas applicable à de très grands systèmes, ni à des conditions de distribution plus ou moins insolites.

Conditions de marche à vide des moteurs d'induction monophasés, par R.-E. HELLMUND (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, avril 1918).

L'auteur expose des méthodes permettant de calculer les champs, les courants magnétisants de stator et de rotor, ainsi que les voltages tertiaires, pour les convertisseurs de phase et les moteurs d'induction monophasés en marche à vide. La question est traitée en partant des conditions fondamentales suivantes : 1° Dans tout circuit fermé, la somme de toutes les forces contre-électromotrices doit être, à chaque instant, égale et de sens

contraire à la force électromotrice appliquée; 2° la vitesse de changement du flux, dans une bobine, doit être à chaque instant proportionnelle à la force électromotrice inductive, à induire; 3° la somme des ampères-tours agissant sur une certaine portion de l'entrefer est proportionnelle à la densité magnétique en cette portion. D'après ces données, il n'existe ordinairement qu'une seule distribution définie du champ résultant, qui satisfasse aux conditions, pour les enroulements primaire et secondaire simultanément. Cette distribution du champ étant obtenue, on en déduit le mode convenable de distribution des ampères-tours sur la circonférence de l'entrefer.

Pour les détails ainsi que pour les conclusions de cette étude, qui ne comporte pas moins de 84 pages, il y a lieu de se référer au Mémoire original.

L'usine hydro-électrique automatique de Cedar Rapids (Iowa), par J.-M. DRABELLE et L.-B. BONNETT (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1918).

Cette usine génératrice témoigne d'un véritable progrès dans la commande automatique des stations centrales, puisque, malgré son importance, elle fonctionne sans aucun personnel et n'en possède pas moins tous les moyens de contrôle voulus.

Elle comporte trois alternateurs, du type vertical, de 400 kw et 500 kv-A (facteur de puissance = 0,8) pour courant diphasé à 60 périodes par seconde, 2300 volts, 60 tours par minute, et elle est destinée à fonctionner en parallèle avec la centrale principale à turbines à vapeur, d'une puissance totale d'environ 20 000 kv-A, et distante de 1 km. Une caractéristique remarquable de l'installation est la suppression des régulateurs usuels, les vannes d'admission d'eau dans les turbines étant actionnées par moteurs électriques commandés par des ampèremètres à contacts. Chaque unité hydro-électrique possède un panneau de commande individuelle, comportant les contacteurs et relais nécessaires pour relier cette unité aux barres omnibus, au moment voulu. Un contrôleur à tambour, actionné par moteur, règle les intervalles de temps auxquels l'alternateur est relié à la ligne. Le démarrage de chaque alternateur peut être commandé ou par un interrupteur à flotteur quand le niveau du réservoir atteint la hauteur voulue, ou par un bouton de commande actionné à l'usine à vapeur. La mise en marche de la première unité introduit sur la ligne le moteur de l'un des deux groupes d'excitation et cette unité ne peut être reliée au réseau avant que le voltage d'excitation n'ait atteint la valeur normale. Les vannes des turbines sont alors ouvertes partiellement et l'alternateur prend à peu près sa vitesse de synchronisme; il est alors relié aux barres omnibus, mais sans excitation et à travers une réactance à noyau de fer. Puis, une faible excitation est appliquée. Celle-ci étant ensuite augmentée et amenée à sa valeur normale, la réactance est mise en court circuit. L'ampèremètre à contacts ouvre en plein les vannes d'admission et l'alternateur prend alors sa pleine charge, en l'espace d'à peu près 40 secondes qui suit la fermeture du bouton de commande ou celle de l'interrupteur à flotteur.

L'Usine de Cedar Rapids fonctionne depuis le 2 octobre 1917, sans avoir jamais donné lieu à des troubles ou dérangements de quelque importance.



BIBLIOGRAPHIE.

Les applications de la Physique pendant la guerre, par H. VIGNEROY. 1 volume in-8°, Masson et C^{ie}, éditeurs.

« Ce livre, qui répond à tant de questions techniques restées sans réponse pour tous ceux que leurs fonctions n'avaient pas mis au nombre des initiés, aurait pu paraître plus tôt si la censure ne s'y était opposée. » Ces simples mots détachés de l'Avant-Propos des *Applications de la Physique pendant la guerre* suffisent pour caractériser l'actualité du volume.

Tout le monde a pu constater, au cours de cette guerre, l'extraordinaire développement pris par l'Art militaire. Mais bien que, sous l'impérieuse pression des événements, les Sections techniques, jusqu'alors inaccessibles, se soient pour ainsi dire installées sur la place publique, faisant appel à tous et confondant dans la même activité patriotique savants, techniciens et officiers, les seuls résultats matériels étaient connus du public, et les directrices de la collaboration féconde où s'étaient si complètement rencontrées la science et l'industrie restaient sinon insoupçonnées, du moins cachées aux yeux du plus grand nombre.

Par un exposé méthodique au cours duquel il passe en revue, les principes, les lois, les matérialisations et l'efficacité de la ou des solutions de chaque problème, l'auteur soulève un coin du voile et met à la portée de tous ceux qui s'intéressent aux applications de la science les éléments indispensables de compréhension.

L'Ouvrage est divisé en sept Chapitres principaux dont voici les rubriques :

Reconnaissance, repérage et signalisation optiques. — La guerre aérienne. — La guerre sous-marine. — La Balistique. — La Mécanique. — La télégraphie sans fil. — Applications diverses.

On voit par cette énumération combien est grande la variété des sujets traités. Mais de cette variété même se dégage l'impression d'un effort considérable, qui par la diversité des idées, l'accumulation des données, et les progrès réalisés dans l'art de produire et la qualité des produits doit puissamment contribuer au développement économique futur.

Cours de Physique générale. — Leçons professées en 1913-1914 à la Faculté des Sciences de l'Université de Lille, par H. OLLIVIER. Tome III : *Mouvements vibratoires, Acoustiques, Optique physique, ondes électromagnétiques. Électro-optique. Effets optiques du mouvement.* A. Hermann et fils, éditeurs, Paris, 1 vol. in-8°, 632 pages et figures.

Nous avons déjà rendu compte, lors de leur apparition, des deux premiers volumes de cet excellent Traité de Physique, consacrés le premier à l'Électricité et au Magnétisme, le second à la Thermodynamique. Le volume que nous recevons aujourd'hui, quoique plus spécialement consacré à l'Optique, est encore d'un haut intérêt pour l'Électricien : on

n'ignore pas en effet les rapports profonds et étroits qui existent entre l'électricité et la lumière, et, même au point de vue pratique, l'étude des courants alternatifs, et de toutes les questions qui dépendent des oscillations électriques, est singulièrement facilitée pour celui qui possède des connaissances approfondies en Optique.

Ce volume débute par une étude des fonctions périodiques et des mouvements vibratoires considérés au point de vue purement mécanique. Le passage au domaine de la physique se fait par l'étude de la propagation des ébranlements dans les fluides. Cette partie de la Physique qui est depuis longtemps classique, a été renouvelée par les importantes découvertes de Gouy sur la propagation des ondes sphériques, dont le point le plus important et le plus singulier est cette avance de $\frac{\lambda}{4}$ du mouvement réel loin de la source sur le mouvement calculé comme pour une onde plane : tout se passe comme si, dans le voisinage de la source, une vitesse de propagation plus grande que la vitesse réelle faisait gagner au mouvement vibratoire cette avance de $\frac{\lambda}{4}$. Comme corollaire, une onde convergente qui passe par un foyer gagne une avance de $\frac{\lambda}{2}$. Ces remarques ont des applications importantes en Optique et en Électro-optique.

Après un Chapitre consacré aux vibrations des corps solides, l'auteur, dans un exposé court mais substantiel, aborde l'étude du principe de Huyghens et montre clairement les difficultés considérables que soulève ce principe à la fois si simple et si profond. Puis vient le principe de Doppler-Fizeau étudié aussi au point de vue uniquement mécanique.

Ainsi préparée l'étude de l'acoustique est résumée dans un court Chapitre qui gagnera à être développé dans une prochaine édition : en particulier la théorie de timbre tient tout entière en moins d'une page, ce qui est peut-être insuffisant.

En revanche, tous les soins de l'auteur sont apportés au reste du volume consacré à l'Optique physique dont l'étude est d'abord faite au point de vue de Fresnel, ce que nous ne saurions trop approuver, car les succès de la théorie électromagnétique ne doivent pas faire oublier l'œuvre admirable du grand physicien français. On trouvera là toutes les parties classiques de l'Optique, interférences, diffraction, optique cristalline, polarisation rotatoire ; nous noterons en passant la représentation sphérique des vibrations elliptiques imaginée par Henri Poincaré et qui donne de grandes facilités d'exposition à ces questions difficiles.

Après ce Chapitre sur la question nouvelle des cristaux liquides, nous revenons à l'Électricité avec l'étude des oscillations amorties et du galvanomètre, puis des grandes nouveautés de ces vingt-cinq dernières années, les appareils thermo-ioniques, les oscillations électriques, la télégraphie sans fil, et les notions d'électro-optique. Enfin le volume se termine par plusieurs Chapitres du plus haut intérêt sur les effets optiques du mouvement : nous noterons ici la distinction, aujourd'hui classique, de la vitesse de la lumière, et de la vitesse des trains d'ondes lumineuses dans les milieux dispersifs, l'explication des phénomènes du premier ordre par rapport à l'aberration par l'éther immobile et l'entraînement du vecteur polarisation avec la matière et enfin l'exposé de la très belle expérience de Sagnac qui, pour la première fois, a permis de mettre en évidence un mouvement de rotation absolu. Quant aux phénomènes du second ordre, leur absence, constatée par l'expérience célèbre de Michelson, amène au célèbre principe moderne de la relativité : des notions très sommaires sur ce principe forment le dernier Chapitre de cet Ouvrage remarquable par sa clarté, sa concision, le souci d'éviter les phrases inutiles, et le talent

d'être moderne sans excès. Nous ne saurions trop le recommander à quiconque veut s'élever au-dessus de la pratique journalière, et se mettre au courant, par un excellent *Traité* didactique, de ce qu'il faut connaître de la Physique moderne.

IL Y A TRENTE ANS.

Juillet 1889. — Sur les expériences de M. H. Hertz, par M. JOUBERT. — Note sur le moteur électromagnétique destiné à la manœuvre des disques ou signaux à vue des chemins de fer (système G. DUMONT et POSTEL-VINAY).

ERRATA.

Nous recevons de M. Mauduit la rectification suivante relative à sa Communication du 5 mars :

« Je reçois de la Société générale de Condensateurs électriques, de Fribourg (Suisse), qui fabrique les condensateurs Moscicki, une lettre me signalant que les condensateurs primitivement placés, puis supprimés sur les locomoteurs 1-E-1 du Lœtschberg (*Bulletin* d'avril 1919, p. 292) n'étaient pas des condensateurs Moscicki de sa fabrication, mais des appareils provenant d'une maison concurrente.

» Je lui donne volontiers acte de cette rectification et m'excuse de l'erreur involontaire commise à ce sujet. »

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)

PARIS 30 FR. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE 32^{fr.}

Prix du numéro : 3 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de poste.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS,

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits.

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine) et à LYON.

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

Pour la *Commande de :*

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines
installées en France
par la **Compagnie Electro-Mécanique**
et ses Licenciés,

plus de 1.200.000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Stations Centrales.

Transports de Force.

**Traction électrique par courant
continu et par courant alternatif.**

Éclairage électrique des trains.

**Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.**

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminoirs.

**Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.**

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

ACCUMULATEURS

ELECTRIQUES

FULMEN

Bureaux et Usine : à CLICHY, 18. Quai de Clichy.

FILS ET CABLES

POUR L'ÉLECTRICITÉ

R. ALLIOT & ROL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

38, rue de Reuilly, 38

PARIS

Tél. : BOUQUETTE 03 20

CABLERIE DE JEUMONT

TUBES

ISOLATEURS

ISOLANTS MOULÉS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du mercredi 5 novembre 1919 : Admission de Membres titulaires, p. 507. — Membres décédés, p. 508. — Étude sur la traction en courant continu. Alimentation des réseaux de tramways et de métropolitains (M. Guéry), p. 509. — Mesures électriques en haute fréquence (M. Brillouin), p. 555.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 571.

BIBLIOGRAPHIE, p. 579.

INFORMATION, p. 582.

IL Y A TRENTE ANS, p. 582.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 5 novembre 1919 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. GRATZMULLER, VICE-PRÉSIDENT.

La séance est ouverte à 20 h 35 m.

Le procès-verbal de la précédente réunion mensuelle est adopté.

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

- Blondin** (Marcel-Henry), Ingénieur dessinateur à la maison Brandt et Fouilleret, 5, rue Euryale-Dehaynin, à Paris, 19^e. — Présenté par MM. J. Blondin et L. Joly.
- Bochet** (Pierre), Ingénieur à la Société des Moteurs thermiques, 2, Scheffer, à Paris, 16^e. — Présenté par MM. A. Bochet et P. Janet.
- Breitmann** (Léo), Ingénieur A. et M. et E. S. E., 63, rue du Cardinal-Lemoine, à Paris, 5^e. — Présenté par MM. P. Janet et Jouvion.
- Chinol** (Maurice), Ingénieur diplômé de l'École supérieure d'Électricité, 3 *bis*, rue Saint-Cyr, à Bourg-la-Reine (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et Chaumat.
- Ferrand** (Alphonse), Ingénieur à la Compagnie des Chemins de fer P.-L.-M. et Ingénieur à l'Office central d'études du matériel de Chemins de fer, 8, quai Henri-IV, à Paris. — Présenté par MM. Dubois et Mazen.
- Imbs**, Directeur de la Compagnie parisienne de Distribution d'électricité, 23, rue de Vienne, à Paris. — Présenté par MM. A. Sartiaux et Mazen.
- Jullien** (Léon), Chef de bataillon du Génie, Chef du Centre radiotélégraphique de Paris, Tour Eiffel, à Paris. — Présenté par MM. Mazen et L. Joly.
- Motard** (Suzanne-Louise), Ingénieur diplômé de l'École supérieure d'Électricité, à Frouard (Meurthe-et-Moselle). — Présentée par MM. P. Janet et Chaumat.
- Papoutchian** (Georges), Ingénieur diplômé de l'École supérieure d'Électricité, 24, rue Saint-Donatien, à Nantes (Loire-Inférieure). — Présenté par MM. P. Janet et Chaumat.
- Ulrich** (Jacques), Administrateur délégué de la Société d'Électricité de Paris; Administrateur directeur de la Société d'Électricité et Gaz du Nord; Administrateur délégué de la Société parisienne pour l'industrie des Chemins de fer et Tramways électriques, 28, rue d'Assas, Paris, 6^e. — Présenté par MM. Mazen et L. Joly.

M. le PRÉSIDENT fait part à la Société du décès de M. *Brémond*, mort au champ d'honneur, et du décès de MM. *Aliamet*, *P. Besson*, *Coquelet*, *Feder*, *Gaultier*, *Gendre*, *Larousse*, *Malassis de la Cussonnière*, *Monthiers* et *Ruelle*. Il adresse aux familles de ces collègues les condoléances de la Société.

Il est fait part à la Société de la nomination de M. Mailloux, ancien président de la Société des Ingénieurs électriciens Américains, comme président de la Commission Électrotechnique Internationale.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

**ÉTUDES SUR LA TRACTION ÉLECTRIQUE PAR COURANT CONTINU.
ALIMENTATION DES RÉSEAUX DE TRAMWAYS ET DE MÉTROPOLITAINS.**

M. GUÉRY. — « Messieurs, bien que certaines applications en vue aient appelé récemment l'attention sur la traction par courant continu, la communication que je vais avoir l'honneur de vous présenter n'est nullement une œuvre d'actualité. A part une mise au point qu'elle a dû subir, elle avait été préparée entièrement avant la guerre. J'en ai détaché en février 1918 la partie relative au retour du courant par les rails, dans le but d'apporter ma contribution à des études en cours à cette époque. Les problèmes techniques et économiques étant de nouveau aujourd'hui au premier plan de nos préoccupations, il m'a semblé que l'heure était venue de vous présenter l'ensemble de mon travail.

» La détermination des sous-stations et des lignes d'alimentation des réseaux de traction offre un caractère assez spécial, qui ne tient pas, il est vrai, à des causes purement électriques et résulte surtout de la complication des données. Les variations de puissance se produisant à la fois dans le temps et dans l'espace, il est difficile d'estimer à l'avance la grandeur de ces variations elles-mêmes; il l'est plus encore d'en suivre les effets. On est donc généralement conduit à opérer sur des moyennes, qu'il reste à établir correctement.

» Ces différents sujets n'intéressent pas seulement les ingénieurs spécialisés dans la traction, mais aussi ceux des réseaux de distribution qui desservent des réseaux de traction et les constructeurs qui ont à leur fournir du matériel. C'est pourquoi j'ai pensé qu'il pourrait être opportun d'exposer l'ensemble de la question, suivant des méthodes dont j'ai acquis l'expérience personnelle.

PREMIÈRE PARTIE.

ÉTUDE DU PROJET DE TRACTION.

» L'étude du projet de traction peut être poursuivie à plusieurs points de vue différents. Elle doit tout d'abord servir à la détermination de la puissance des moteurs. C'est là une question capitale, mais qui, si on l'envisage seulement pour elle-même, sort du cadre que nous nous sommes tracé. Nous nous bornerons à envisager

cette étude au point de vue de la puissance demandée par un train à l'usine ou à la sous-station qui l'alimente. Dans cet ordre d'idées, on peut encore donner plus ou moins d'extension au problème, suivant que l'on veut seulement évaluer l'énergie totale consommée dans un voyage ou la consommation spécifique moyenne qui s'en déduit, ou bien que l'on cherche à déterminer la puissance demandée en chaque point du parcours.

» *Méthode pour la détermination de la consommation spécifique.* — Dans le premier cas, on peut parfois se contenter de la méthode qui consiste à déterminer d'abord l'énergie mécanique nécessaire, d'une part à mettre le train en vitesse, et, d'autre part, à vaincre l'effort résistant. En appliquant à l'énergie ainsi déterminée un coefficient de rendement convenablement choisi, on en déduit l'énergie électrique nécessaire. Cette méthode est d'une application particulièrement facile lorsque les conditions de tracé et d'horaire sont simples, comme il arrive parfois pour des lignes de chemins de fer. Elle présente plus de difficultés d'application pour les lignes métropolitaines et les tramways. Elle peut toutefois être utilisée, même dans ce dernier cas, et donner des résultats suffisamment précis, moyennant certaines précautions.

» Au point de vue spéculatif, elle est intéressante, car l'étude à laquelle elle donne lieu fait ressortir assez simplement les diverses conditions qui influent sur la consommation spécifique. C'est surtout à ce sujet que nous allons en dire quelques mots.

» Nous supposons que le système de traction employé ne comporte aucune récupération d'énergie électrique.

» Dans ces conditions, au moment du démarrage, pendant toute la période où la vitesse s'accroît, l'effort moteur est employé, d'une part à vaincre les résistances passives qui se rencontrent pendant cette période, et, d'autre part, à accumuler de l'énergie vive. Une partie de cette énergie est utilisée, pendant la course sur l'erre et le freinage, à vaincre les résistances passives de ces deux dernières périodes du mouvement.

» Le bilan de l'énergie mécanique fournie aux essieux s'établit de la manière suivante :

» Si l'on suppose connue la vitesse v_f au début du freinage, on calcule l'énergie vive perdue entre cette vitesse v_f et l'arrêt, et on lui ajoute l'énergie dépensée contre les résistances passives pendant la période précédant le freinage. On compte pour zéro l'énergie dépensée contre les résistances passives pendant les périodes de freinage.

» Soit donc $T_R + T'_R$ l'énergie dépensée contre les résistances passives pour le parcours aller et retour d'une tonne de train, sur une ligne de longueur L kilomètres, pendant les périodes où les freins ne sont pas appliqués.

» La consommation spécifique correspondante a pour valeur

$$W_R = \frac{T_R + T'_R}{2L};$$

nous la supposons évaluée en watts-heure.

» La vitesse étant exprimée en mètres par seconde, si l'on désigne par j un coefficient tenant compte de l'inertie de rotation et qui est en général voisin de 1,1, l'énergie vive communiquée au train de P tonnes et perdue pendant le freinage a pour valeur en watts-heure,

$$0,139jPv_f^2.$$

» Pour faire ressortir l'influence sur la consommation d'énergie des différents éléments du tracé et du mouvement, nous envisagerons un cas particulier simple :

» Nous supposons que, dans chaque période de marche, le freinage commence à la même vitesse v_f , que tous les freinages s'opèrent sur une même longueur. Nous supposons en outre que tous les démarrages s'opèrent dans les mêmes conditions d'effort moteur et d'effort résistant, de telle sorte que la période pendant laquelle les moteurs fonctionnent à tension variable a toujours la même durée et se termine toujours à un moment où les moteurs ont la même vitesse v_u . Enfin nous admettrons que les pentes sont assez faibles pour qu'il ne soit pas nécessaire de freiner en dehors des périodes précédant immédiatement les arrêts normaux.

» Si $2n$ est le nombre de démarrages par parcours aller et retour, la consommation spécifique correspondant à l'énergie vive perdue pendant le freinage a pour valeur

$$W_a = \frac{0,139njv_f^2}{L}.$$

» La consommation spécifique utile totale a donc pour valeur

$$W_u = W_R + W_a = \frac{\frac{T_R + T'_R}{2} + 0,139njv_f^2}{L}.$$

» Pour une ligne métropolitaine, W_R est environ les deux tiers de W_u .

» *Évaluation du rendement.* — Il reste à déterminer le rendement à appliquer.

» Nous remarquerons d'abord que dans la partie de la caractéristique où l'on utilise pratiquement les moteurs, le rendement de ceux-ci à pleine tension varie peu. Nous adopterons donc une certaine valeur moyenne ρ_m pour ce rendement.

» La valeur à attribuer au rendement pendant la période de démarrage sur résistances est affectée à la fois par la variation de la tension aux bornes des moteurs et par l'influence des pertes dans les résistances.

» On peut la déterminer approximativement par les considérations suivantes :

» Supposons, pour fixer les idées, qu'il s'agisse d'un équipement comportant seulement deux groupements de moteurs : série et parallèle.

» Théoriquement, lorsqu'on fait un démarrage automatique, ce qui est maintenu constant c'est l'intensité du courant; mais pratiquement cette intensité est loin d'être constante et, sur les courbes d'ampèremètre enregistreur, abstraction faite même des pointes dues aux crans de démarrage, on la voit croître pendant chacune des deux périodes correspondant à la marche en série et à la marche en parallèle. On ne sort donc pas de l'ordre d'approximation que comporte le sujet en considérant également l'effort comme constant; ainsi la vitesse croît proportionnellement au temps, de même que la force contre-électromotrice.

» Par suite, si nous portons en abscisses les temps, en ordonnées les puissances, la puissance utile des moteurs sera représentée par une droite OA passant par l'origine (*fig. 1*).

» Les pertes du moteur pendant la marche à intensité constante peuvent être divisées en deux parties : la première, constante, comprenant principalement l'effet Joule dans les enroulements; l'autre croissant avec la vitesse, et par suite avec le temps, et comprenant principalement les pertes dans le fer. Nous ferons l'hypothèse grossièrement approchée que ces pertes croissent proportionnellement au temps. La puissance fournie aux moteurs est donc représentée par la droite BA, telle que les portions d'ordonnées comprises entre cette droite et la droite BA, parallèle à OA représentent les puissances perdues variables; BO représentant les puissances perdues fixes.

» La puissance totale fournie et celle absorbée par les moteurs sont égales entre elles à la fin du démarrage en série et à la fin du démarrage en parallèle. D'autre part, la puissance totale est con-

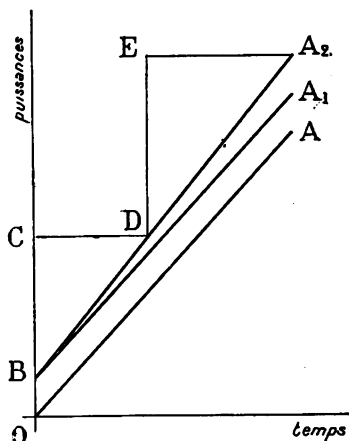


Fig. 1.

stante pour chacune de ces périodes, et deux fois plus grande pendant la marche en parallèle que pendant la marche en série. Elle est donc représentée par le contour CDEA₂, dans lequel OC = DE.

» Les puissances perdues dans les résistances de démarrage sont représentées par les ordonnées comprises entre ce contour et la droite BA₂.

» Un calcul sans intérêt déduit de la figure 1 montre que, si l'on désigne par ρ_d le rendement moyen de l'ensemble moteur et résistances pendant la période considérée, par λ le rapport des pertes variables aux pertes fixes à pleine charge et pleine tension, la valeur de ρ_d est donnée par l'expression

$$\rho_d = 2 \frac{(1 + \lambda)^2 + \lambda(1 + \lambda) \left(\frac{1}{\rho_m} - 1 \right)}{3(1 + \lambda)^2 + 2(3\lambda + 2)(1 + \lambda) \left(\frac{1}{\rho_m} - 1 \right) + (3\lambda^2 + 4\lambda + 1) \left(\frac{1}{\rho_m} - 1 \right)^2}.$$

» Pour $\lambda = 1$, condition qui se rapproche de la réalité, on a

$$\rho_d = \frac{2 + \left(\frac{1}{\rho_m} - 1 \right)}{3 + 5 \left(\frac{1}{\rho_m} - 1 \right) + 2 \left(\frac{1}{\rho_m} - 1 \right)^2}.$$

» Pour $\rho_m = 0,87$, rendement d'un moteur de chemins de fer

ou de métropolitain,

$$\rho_d = 0,56.$$

» Pour $\rho_m = 0,84$, rendement d'un moteur de tramway,

$$\rho_d = 0,55.$$

» On voit que l'influence de ρ_m est assez faible sur la valeur de ρ_d .

» On voit également qu'il y a un intérêt majeur à réduire la portion de l'énergie utile à laquelle s'applique ce faible rendement. On y parviendra évidemment en adoptant pour la vitesse à la fin de cette période une valeur aussi faible que possible, la part d'énergie utile nécessaire à la mise en vitesse étant en général fortement prédominante.

» De la connaissance de ρ_m et de ρ_d nous déduisons aisément celle du rendement moyen ρ . Pour obtenir la valeur de l'énergie électrique à fournir, il faut diviser par ρ l'énergie utile totale correspondant par exemple à une tonne de train et à un parcours aller et retour.

» La portion de l'énergie utile $2LW_d$ à laquelle se rapporte le rendement ρ_d peut être calculée assez exactement.

» Elle se compose principalement de l'énergie vive nécessaire pour communiquer à une tonne de train la vitesse v_d correspondant à la fin du démarrage sur résistances et qu'il est facile de calculer. Elle comprend en outre l'énergie utile dépensée pour vaincre les résistances passives pendant la durée de cette période de démarrage. Cette deuxième portion est assez faible par rapport à la première pour qu'on puisse en faire une estimation approchée sans entacher d'erreur grave le résultat final.

» L'énergie fournie pendant la période de démarrage sur résistances a pour valeur $2L \frac{W_d}{\rho_d}$; l'énergie fournie pendant les autres périodes de marche a pour valeur $2L \frac{W_u - W_d}{\rho_m}$, avec l'approximation que nous avons admise.

» Par suite le rendement ρ a pour valeur

$$\rho = \frac{W_u}{\frac{W_d}{\rho_d} + \frac{W_u - W_d}{\rho_m}}.$$

» Pour des lignes métropolitaines on trouve des valeurs de ρ voisines de 0,75, avec les équipements à deux crans de marche économique généralement en usage.

» L'emploi de deux crans de marche économique seulement,

même avec des équipements à quatre moteurs par exemple, qui permettent trois groupements différents, résulte d'une espèce de dogme qui s'était établi il y a fort longtemps, et d'après lequel il ne serait pas possible de mettre en série plus de deux moteurs montés sur des essieux indépendants, sans s'exposer à des patinages dangereux pour la conservation du matériel. Ce dogme a vécu, comme vous savez, puisque certaines locomotives américaines comportent des groupements de douze moteurs en série. Nous avons nous-mêmes, sur un équipement d'essai du chemin de fer Nord-Sud, effectué des démarrages avec quatre moteurs en série sous 1200 volts dans des conditions de marche et de profil particulièrement difficiles et sans qu'aucun inconvénient en soit résulté.

» Dans les conditions indiquées plus haut, la mise en série de quatre moteurs au démarrage ferait remonter le rendement moyen de 0,75 à 0,80 environ.

» Nous allons maintenant faire ressortir quelques conséquences de la faible valeur du rendement pendant la période de démarrage.

» *Choix des moteurs au point de vue de la consommation d'énergie.*

— Le moteur étant choisi, si l'on était libre de choisir également la valeur de l'accélération correspondant à la période de démarrage sur résistances, on aurait évidemment intérêt, comme notre collègue, M. de Traz, vous l'a fait observer en 1909, à donner à cette accélération la plus grande valeur compatible avec les conditions de fonctionnement électrique des moteurs.

» Ce fait ressort aisément d'ailleurs des considérations qui précèdent; en effet, pour avoir une grande accélération, il faut un grand effort moteur; pour un moteur donné, plus l'effort moteur est grand, plus la vitesse à la fin du démarrage est réduite, et par suite, plus le rendement moyen est grand.

» Avec les fortes capacités de surcharge que confèrent les pôles de commutation, on pourrait aujourd'hui aller loin dans cette voie. Malheureusement, le démarrage par cran oblige à imposer à la valeur admise pour l'accélération une limite assez basse, et nous devons nous placer dans l'hypothèse que cette limite est atteinte.

» La question se présente sous un jour différent si le moteur n'est pas choisi et s'il s'agit au contraire de fixer ce choix. Tout d'abord, pour un moteur déterminé, la puissance fournie à pleine tension, pour un effort donné à la jante, est en raison inverse du rapport d'engrenages. On choisit donc en général, pour un métro-

politain, le rapport d'engrenages le plus grand qui soit compatible avec les considérations d'ordre mécanique et d'encombrement maximum.

» D'autre part, en général, deux moteurs de traction de puissance différente se distinguent en ce que le plus puissant a, pour un même couple, une vitesse plus grande.

» Ce fait ne résulte pas d'une obligation absolue, mais il est justifié par des considérations de bonne utilisation de la matière. C'est ainsi qu'on trouve une proportion constante entre la puissance unihoraire et la vitesse correspondant à un couple donné, pour les moteurs normaux d'un constructeur déterminé ⁽¹⁾.

» Si donc, pour les raisons indiquées plus haut, le rapport d'engrenages est également fixé, pour un même effort à la jante, la vitesse de pleine marche sera sensiblement proportionnelle à la puissance du moteur. Or nous avons vu qu'au démarrage la valeur de l'accélération était imposée. Par suite, l'effort moteur est également fixé.

» L'énergie dépensée à mauvais rendement pendant la période de marche sur résistances croît donc très rapidement avec la puissance du moteur. Comme on a, en général, intérêt, pour diminuer les frais d'entretien, à employer des moteurs puissants, on voit que, pour réduire la dépense d'énergie plus grande qui résulte de ce choix, il faut, ou bien augmenter le nombre des crans de marche économique, ou bien renoncer à la meilleure utilisation de la matière dans le moteur, ce qui ne peut se faire que par une étroite collaboration, difficile à obtenir, avec le constructeur, ou bien enfin augmenter le rapport d'engrenages en employant des systèmes de réduction de vitesse plus perfectionnés que ceux actuellement en usage.

» *Relation entre la vitesse commerciale et la consommation d'énergie.* — Voici encore une conséquence du mauvais rendement pendant la période de démarrage. On impose aux moyens de transport urbains des conditions qui, *a priori*, s'accordent assez mal

(1) Nous trouvons par exemple les chiffres suivants pour trois moteurs de 60, 80, 100 chevaux unihoraires du même constructeur :

Puissance unihoraire.....	60	80	100
Effort à la jante, en kg.....	800	800	800
Vitesse correspondante, en km : h.....	17	23,5	29
Rapport de la vitesse pour un même effort à la jante de 800 kg à la puissance unihoraire.....	0,284	0,294	0,29

entre elles : bon marché, marche rapide, arrêts fréquents. On peut voir aisément que le nombre des arrêts étant fixé, quand on veut augmenter la vitesse commerciale au delà d'une certaine limite, avec les systèmes actuellement employés, on fait croître très rapidement la consommation d'énergie. Il est intéressant d'insister sur ce point; car un raisonnement trop rudimentaire pourrait faire croire que la vitesse commerciale est à peu près sans influence sur la consommation lorsque le nombre des passages de trains est fixé. Si, en effet, dans ces conditions la consommation spécifique n'était pas affectée par l'accroissement de vitesse commerciale, la consommation totale ne le serait pas non plus; mais si, le nombre des arrêts étant fixé, on veut accroître la vitesse commerciale, il arrive un moment où il faut également accroître la vitesse de pleine marche et, par contre-coup, les vitesses en fin de démarrage et au début du freinage; c'est à partir de ce moment que, pour les motifs exposés plus haut, la consommation d'énergie se met à croître très rapidement.

» Nous avons constaté ce fait bien souvent au cours de nos études et nous croyons pouvoir dire en particulier que, dans les conditions actuelles d'établissement des lignes métropolitaines, lorsque la distance moyenne entre stations est de l'ordre de 400 m à 500 m, la vitesse commerciale ne peut guère dépasser 20 km à 22 km à l'heure.

» *Influence du « contrôle par le champ » sur la consommation d'énergie.* — On peut déduire de ce qui précède que tout effort fait pour réduire la consommation inhérente à la période de démarrage aura son effet très sensible sur la consommation totale. C'est ainsi que, par le procédé d'ailleurs connu depuis longtemps dit du *contrôle par le champ*, qui consiste à renforcer l'excitation des moteurs pendant la période de démarrage, on obtient une réduction notable de la consommation. Ce procédé qui n'est efficace, bien entendu, que lorsque la saturation du fer n'est pas trop grande et qui, pour des considérations accessoires, exige l'emploi de moteurs à pôles de commutation, tend à se répandre actuellement. Il a été essayé avec succès au chemin de fer Nord-Sud de Paris, pour la première fois, croyons-nous, sur un équipement à contacteurs. Il a donné de très bons résultats et sera étendu au matériel actuellement en construction ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Le Nord-Sud poursuit également la réalisation de motrices pouvant fonctionner sous 1200 volts en s'alimentant entre fil et rail (voir la description des installations du

» *Bilan complet de la consommation spécifique.* — La méthode que nous venons de rappeler pour la détermination de la consommation spécifique permet de dresser un bilan complet de cette consommation.

» Nous allons donner un exemple du résultat qu'elle fournit pour deux lignes métropolitaines, l'une moyennement accidentée, l'autre au contraire à profil tout particulièrement dur. Les consommations spécifiques aux bornes des sous-stations dans des conditions comparables sont respectivement pour ces lignes de 54,5 et 70 watts-heure par tonne-kilomètre.

» Voici comment cette consommation se répartit approximativement (Tableau I) :

» Le mot *énergie utile* doit être entendu au point de vue électrique, car l'énergie que nous désignons ainsi correspond, pour la partie non récupérable, à des pertes par frottements qu'il serait possible de réduire par des améliorations d'ordre mécanique.

» *Méthode d'étude des conditions de traction pour un moteur déterminé.* — Ce qui précède montre bien quel est l'intérêt d'une étude précise des conditions de traction, principalement dans le cas d'une ligne métropolitaine. M. Parodi vous a exposé en 1909 une méthode tendant à ce but. Je vais maintenant vous faire connaître celle que nous employons depuis quelques années à l'Omnium Lyonnais et dont l'idée première peut être considérée comme le développement de la méthode simplifiée que je vous ai rappelée tout à l'heure.

» La méthode complète implique naturellement la connaissance des caractéristiques du moteur employé, qui ont dû être choisies par un tâtonnement préalable. C'est donc une méthode de vérification.

» Elle implique également la connaissance détaillée des conditions de plan et de profil et des caractéristiques du matériel roulant employé.

» Il est facile de déterminer la courbe représentant en fonction de l'espace e (*fig. 2*), l'énergie T_R rapportée à une tonne et nécessaire pour vaincre les résistances passives : résistance au roulement, résistance de l'air, résistance due aux courbes et aux rampes.

Nord-Sud dans la Communication de juin 1911 de M. Petit). Les essais faits dans cette voie ont été également très satisfaisants. Ils permettront, sans rien perdre des avantages du système adopté par le Nord-Sud, de donner plus de souplesse à l'exploitation et de permettre ainsi certaines économies.

TABLEAU I.

		Consommation correspondant au démarrage sur résistances à deux crans de marche économique.			
		Ligne métropolitaine très accidentée.		Ligne métropolitaine moyennement accidentée.	
Énergie mécanique à la jante des roues.	Répartition de l'énergie consommée.	Consommation spécifique (w-h par tonne-km).	Pour 100 de l'énergie non récupérable.	Consommation spécifique (w-h par tonne-km).	Pour 100 de l'énergie non récupérable.
Énergie électrique à la sortie des sous-stations.	Énergie utile non récupérable.	12,3	77,5	12,3	83,8
	Énergie utile en partie récupérable.	3,6	22,5	2,4	16,2
	Énergie utile				
	Courbes.....				
	Total de l'énergie utile non récupérable.....				
	Rampes.....	13,9	100	14,7	100
	Mise en vitesse.....	1,5	116,5	8	54,5
	Total de l'énergie utile en partie récupérable.....	15,3	96,5	15,3	104,5
	Énergie utile totale.....	33,8	213	23,3	159
	Pertes dans les moteurs.....	49,7	313	38	259
Pertes et consommations accessoires électriques.	Pertes dans les résistances.....	7,7	48,6	5,9	40,1
	Éclairage et compresseurs.....	8,3	52,3	6,3	42,8
	Pertes en ligne.....	2,9	18,3	2,9	19,8
	Total des pertes et consommations accessoires électriques.....	1,1	8,8	1,4	9,5
	TOTAL GÉNÉRAL.....	20,3	128	16,5	112,2
		70	441	54,5	371,2

» L'énergie totale T_u à communiquer à une tonne comprend en plus de cette énergie T_R l'énergie vive accumulée depuis le démar-

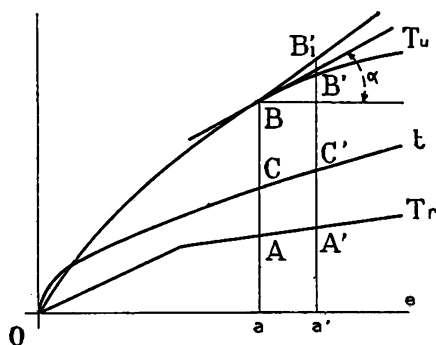


Fig. 2.

rage, et qui, pour $j = 1,1$, a pour valeur en kilogrammètres

$$\frac{1}{2} 1,1 \times \frac{1000}{9,8} v^2 = 56 v^2.$$

» Supposons que, pour une abscisse $O a$, nous connaissions les valeurs $a A$ de T_R et $a B$ de T_u . La portion d'ordonnée AB représente la valeur correspondante de $56 v^2$.

» Or, à une valeur déterminée de v et, par suite, de $56 v^2$, correspond, d'après la caractéristique des moteurs, une valeur déterminée F de l'effort moteur par tonne, et cet effort est lié à la variation de T_u par la relation

$$dT_u = F de.$$

» F représente donc le coefficient angulaire $\tan \alpha$ de la tangente en B à la courbe représentative de T_u en fonction de e . Connaissant F , nous pouvons, par suite, tracer cette tangente.

» Supposons de même que nous connaissions le temps t écoulé depuis l'origine jusqu'au moment où le train est en a , et soit $a C$ l'ordonnée correspondante de la courbe du temps en fonction de l'espace. Nous avons

$$dt = \frac{1}{v} de;$$

la tangente à la courbe des temps a donc pour coefficient angulaire $\tan \alpha = \frac{1}{v}$. Il nous est par suite possible de la tracer.

» Nous avons en même temps, d'après ce qui précède, un point de la courbe de v en fonction de e .

» Pour continuer le tracé des courbes de T_u et de t , nous choisirons une ordonnée $a' A' C' B'$ suffisamment voisine de a ACB, pour que la tangente puisse être confondue avec la courbe dans l'intervalle de ces deux ordonnées. Nous définirons ainsi de nouveaux points des courbes de T_u et de t auxquels nous appliquerons la construction précédente, et ainsi de suite.

» A chaque valeur de ν correspond une valeur de la puissance. Il est donc facile de tracer la courbe de la puissance en fonction du temps.

» Pratiquement on opérera de la manière suivante :

» On préparera d'avance un graphique portant en abscisses les valeurs de F , et en ordonnées (*fig. 3*) :

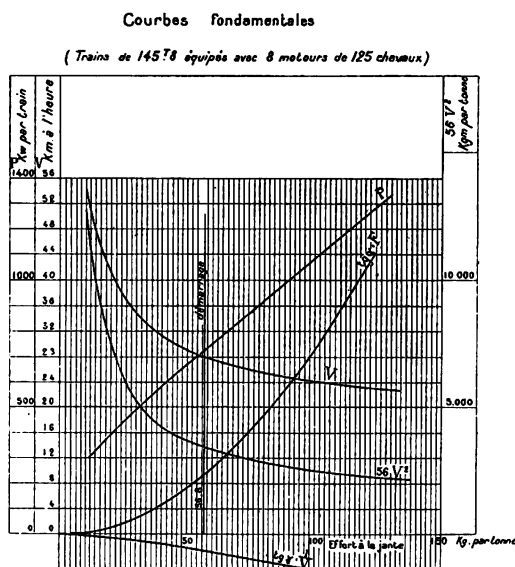


Fig. 3.

- » 1^o La courbe de ν tracée d'après la caractéristique ;
- » 2^o La courbe de $56 \nu^2$ tracée d'après la précédente ;
- » 3^o La courbe dont la tangente a un coefficient angulaire $\tan \alpha = F$;
- » 4^o La courbe dont la tangente a un coefficient angulaire $\tan \gamma = \frac{1}{\nu}$;
- » 5^o La courbe de la puissance P .

» On cherchera sur la courbe de $56 \nu^2$ une ordonnée égale à AB, en superposant à cette courbe, au moyen de papier transparent,

la courbe de T_R en fonction de e ; sur la même ordonnée on trouvera un point de la courbe $\tan \alpha = F$, et par B on mènera une droite parallèle à la tangente à cette courbe au point considéré; on aura ainsi la direction de la courbe T_u .

» On trouvera également, sur la même ordonnée, la valeur de v que l'on reportera sur le papier.

» Enfin on mènera par le point C une parallèle à la tangente à la courbe de $\frac{1}{v}$ au point où cette courbe rencontre l'ordonnée considérée. Sur l'abscisse de C on portera la valeur de P lue sur la même ordonnée.

» Pour plus de clarté, la courbe de $\frac{1}{v}$ est tracée vers le bas, de telle sorte que la courbe des temps et celle des puissances ne se mélangent pas avec celles des travaux et de la vitesse.

» Il nous reste à indiquer comment commence et comment se termine le graphique de T_u et de t .

» Les conditions du démarrage ne sont pas tout à fait les mêmes suivant que celui-ci est ou non automatique.

» Lorsque le démarrage est à la disposition du machiniste, celui-ci peut avoir tendance à maintenir la même accélération moyenne, quelles que soient les conditions de charge ou de profil. Lorsque le démarrage est automatique, ce qui peut être considéré comme constant, c'est l'effort moteur. L'accélération dépend alors des conditions de charge et de profil. Mais pratiquement, dans un métropolitain, le démarrage s'effectue presque toujours en palier et alignement droit et, comme, pour l'étude de traction, on se fixe des conditions de charge uniformes, on peut encore considérer en général l'accélération comme constante pendant le temps de marche sur résistances. La question est ainsi ramenée à un problème de mécanique élémentaire et l'on arrive très simplement à trouver les points des courbes de T_u et de t qui correspondent à la fin de la période de démarrage.

» Pour la course sur l'erre et le freinage, on peut raisonner comme suit :

» A partir du moment où le courant est coupé, la courbe de T_u devient une droite horizontale.

» On peut considérer d'autre part que le freinage s'effectue avec un certain effort retardateur qui dépend des conditions de profil.

» On peut admettre par exemple que, pendant la période de freinage, l'effort retardateur total, somme algébrique de l'effort résistant dû aux conditions de profil et de l'effort de freinage, a une valeur constante déterminée d'avance. Cet effort retardateur

correspondra donc à une inclinaison β déterminée d'avance de la courbe T_f du travail résistant, qui se substitue à la courbe T_R à partir de l'application des freins (*fig. 4*).

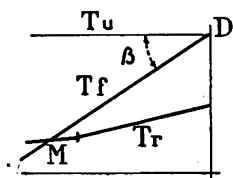


Fig. 4.

» Il est facile maintenant de déterminer le point de la ligne où doit commencer le freinage.

» En effet, à l'arrêt, l'énergie vive étant devenue nulle, $T_u = T_f$.

» On obtiendra donc la position exacte de T_f en menant par le point D où T_u rencontre l'ordonnée correspondant à la fin du parcours une droite inclinée de α sur l'horizontale. Cette droite rencontre la courbe de T_R en un point M dont l'abscisse correspond au point d'application des freins.

» La méthode ne comporte plus qu'une seule indétermination sérieuse, c'est celle de la valeur maxima de T_u . Nous ne pouvons rien dire de général à ce sujet, sinon que cette valeur doit être déterminée de manière à réaliser la vitesse commerciale prévue avec le minimum d'énergie. C'est ici qu'intervient l'art de l'ingénieur d'études, et c'est au même point qu'intervient parallèlement, dans la pratique, le talent du machiniste.

» On peut faire à la méthode précédente l'objection qui suit : cette méthode est basée sur un procédé d'intégration dit : *intégration par la tangente* et qui a la déplorable réputation de cumuler les erreurs. Nous allons montrer que ce reproche, qui peut être justifié dans certains cas, ne l'est pas en ce qui concerne l'application actuelle du procédé.

» Supposons (*fig. 2*) qu'en appliquant la méthode, nous commettions une erreur sur la position du point B'. Soit B' la position faussement attribuée à ce point. Supposons que B' soit au-dessus de B'. En cherchant sur la courbe représentative de $56 v^2$ en fonction de F une ordonnée égale à A' B', cette courbe ayant une allure descendante, nous trouverons pour F une valeur trop faible, et, par suite, la tangente en B' à la courbe T_u sera moins inclinée sur l'horizontale qu'elle ne devrait l'être. Si donc le point B' est placé trop haut, l'application même de la méthode tendra à corriger

l'erreur pour le point suivant. Mais cela tient uniquement à l'allure descendante de la courbe de 56 ρ^2 . Dans un problème où l'on aurait affaire à une courbe montante il n'y aurait plus correction, mais au contraire cumulation d'erreur.

» Nous avons vérifié que la correction se faisait bien dans les conditions pratiques courantes.

» Nous pouvons remarquer que la correction automatique qui se produit sur la valeur de T_u a son effet sur celle de t , la direction de la courbe de t étant déterminée par la valeur de $\frac{1}{\rho}$, laquelle est déduite de la courbe T_u .

» Cette méthode a été appliquée à un grand nombre de kilomètres de lignes par mes collaborateurs, et, en particulier, par notre collègue Tirefort (1) qui l'a mise au point et en a tiré des résultats très intéressants, tant au point de vue de la rapidité qu'à celui de l'exactitude. Ce dernier point de vue ne se prête pas en général à une vérification précise. Car il arrive fréquemment que l'on remanie les tracés des lignes et les données du matériel ou des moteurs postérieurement à l'étude de traction. Nous avons pu néanmoins, dans un cas particulier, opérer dans des conditions excellentes pour cette vérification : il s'agissait d'un prolongement de ligne exploité avec un matériel connu. Pour obtenir un résultat comparable à ceux de la pratique, le projet de traction a été refait pour une partie de la ligne exploitée. Les résultats ont été absolument conformes à ceux relevés en exploitation. Cela ne prouve pas seulement que la méthode est bonne, mais aussi qu'elle est appliquée correctement, c'est-à-dire par des ingénieurs qui se transforment suffisamment bien par la pensée en machinistes exercés.

» La figure 5 donne un exemple d'application de la méthode précédente à l'intervalle compris entre deux stations d'une ligne métropolitaine.

» Remarquons, pour terminer, qu'on déduit très facilement le rendement moyen de l'application de cette méthode. En effet en planimétrant la courbe de P en fonction de t on obtient l'énergie fournie. L'énergie utile est mesurée par l'ordonnée finale de la

(1) Cette Note a été rédigée avant la guerre, dont notre camarade Tirefort a été une des glorieuses victimes. Nous sommes heureux de pouvoir citer son nom à propos d'une méthode dont la mise au point a été due en grande partie à sa persévérance, à l'esprit consciencieux qu'il apportait à tous ses travaux et qui était un des traits dominants de son caractère.

courbe de T_u . Le rendement moyen est le rapport de ces deux quantités.

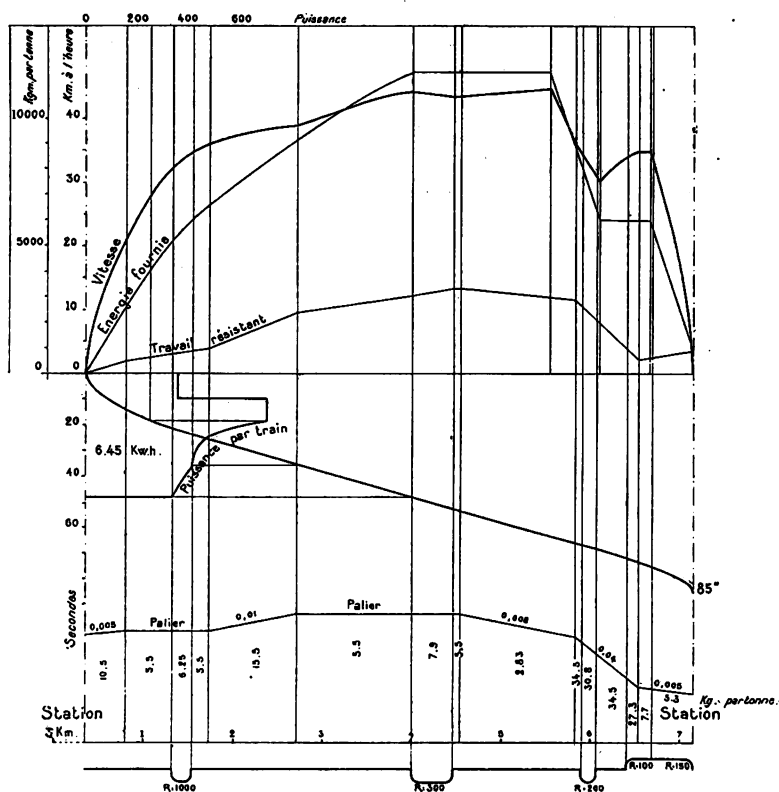


Fig. 5.

Remarques sur les conditions d'emploi des méthodes précédentes.

» La méthode que nous venons d'indiquer et celles qui lui sont analogues présentent le caractère d'une vérification *a posteriori*, puisqu'elles supposent choisi le moteur à employer. Elles conviennent donc bien au constructeur qui doit fournir un moteur répondant à des conditions déterminées. Elles ont également l'avantage de permettre une prévision exacte de toutes les circonstances du mouvement et ainsi de parler aux yeux, même pour des profanes. Mais s'il ne s'agit que de déterminer *a priori* la consommation spécifique d'une ligne donnée, problème qui se pose à l'ingénieur d'une compagnie de traction, la première méthode que nous avons rappelée convient parfaitement et est tout aussi précise, à la condition qu'elle soit appliquée correctement. La plus

grande incertitude qu'elle comporte réside dans la détermination de la vitesse au début du freinage.

Les autres méthodes n'échappent pas à ce genre de difficultés, et c'est d'ailleurs sur le même élément que se manifeste la plus ou moins grande habileté du machiniste.

» Nous faisons cette remarque parce que la vieille méthode simple qu'appliquent depuis de longues années tous les ingénieurs de chemins de fer, et qui est un héritage de la traction vapeur, paraît l'objet chez les électriciens d'un ostracisme qu'elle ne nous semble pas mériter.

DEUXIÈME PARTIE.

DÉTERMINATION DES MOYENNES ET DES ÉCARTS PAR RAPPORT A LA MOYENNE.

» La première Partie de cette étude peut servir d'introduction à la détermination des différentes parties des installations fixes.

» Pour l'étude des usines ou sous-stations, on peut avoir besoin de connaître :

» La puissance moyenne, ou, pour une tension déterminée, le courant moyen d'une part, et, d'autre part, le courant efficace à fournir aux bornes de sortie.

» Les écarts de la valeur instantanée par rapport à la moyenne.

» Les écarts de quantité par rapport à la moyenne.

» *Détermination des moyennes et des écarts par rapport à la moyenne dans le cas d'un horaire parfaitement régulier. Méthode de superposition.* — Dans certains cas, on peut considérer que le mouvement des trains s'effectue suivant un horaire parfaitement déterminé : il en est ainsi, par exemple, pour des lignes de chemins de fer à départs relativement peu fréquents et pour certaines lignes de tramways à voie unique avec évitements.

» Dans ces circonstances particulièrement simples, la méthode à suivre est tout indiquée ; elle consiste à superposer les diagrammes par rapport au temps des intensités prises par chaque train, avec le décalage en abscisse correspondant à l'intervalle de temps compris entre les départs consécutifs.

» On obtient ainsi un graphique d'intensité totale, duquel il est facile de déduire la moyenne et les écarts de quantité par rapport à la moyenne au moyen du planimètre.

» Les écarts de la valeur instantanée se lisent ensuite directement sur le graphique.

» Enfin, l'intensité efficace se détermine en planimétrant la courbe du carré des intensités, déduite de celle des intensités.

» On peut déterminer de même la chute de tension dans un tronçon de ligne. On peut en effet, pour un train supposé seul sur la ligne, tracer une courbe ayant pour abscisses les temps, et pour ordonnées la chute de tension entre le train et le point d'alimentation. Cette chute de tension se détermine aisément. La résistance comprise entre les deux points considérés est connue d'après la courbe espace-temps; l'intensité est connue également d'après la courbe temps-intensité. Si l'on remarque que la chute de tension en bout de ligne est, dans le cas considéré, la même que la chute de tension au train, on voit de suite que, dans le cas de plusieurs trains en service suivant un horaire régulier, on obtiendra la chute de tension en bout de ligne en superposant les courbes de chute de tension de chacun des trains en fonction du temps et ajoutant les ordonnées, c'est-à-dire en employant le même procédé que pour les intensités.

» *Cas d'un horaire irrégulier. Méthode de probabilités.* — La question paraît au premier abord beaucoup plus ardue lorsqu'il s'agit d'une ligne à départs fréquents pour laquelle il n'existe plus qu'un horaire moyen avec des fluctuations assez importantes par rapport à la moyenne. On se contente en général, même dans ce cas, de la méthode qui vient d'être indiquée, que l'on applique comme si l'horaire était parfaitement régulier.

» Cette manière d'opérer laisse un doute dans l'esprit; aussi, ayant eu, il y a quelques années, à faire la détermination en question pour d'importantes sous-stations, nous nous sommes préoccupé d'appliquer une autre méthode qui, à l'encontre de la précédente, suppose le désordre le plus complet dans l'horaire.

» Pour appliquer cette méthode, il est nécessaire de faire un certain nombre de simplifications. En particulier, comme elle repose sur un calcul de probabilités, il est indispensable de transformer les courbes continues qui représentent l'intensité en fonction du temps, de manière à les rendre discontinues. On opère ainsi sur un nombre fini d'objets, qui, dans l'espèce, seront un certain nombre de valeurs de l'intensité.

» La courbe de l'intensité prise par un train entre deux stations a, sauf quelques cas exceptionnels, la forme générale ci-après (*fig. 6*).

» On la rendra discontinue en prenant la moyenne de la partie descendante de la courbe (*fig. 6*, pointillé).

» D'autre part, il est utile de réduire au minimum le nombre des éléments à introduire dans le calcul. Dans ce but, nous ferons l'hypothèse suivante :

» Nous supposons que les courbes de l'intensité prise par chaque train entre deux stations sont toutes identiques et repré-

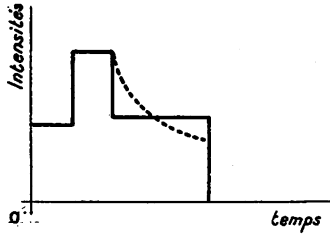


Fig. 6.

sentées par exemple par la figure 6 (pointillé). Cette hypothèse est, jusqu'à un certain point, justifiée pour un métropolitain, où la première partie du démarrage (démarrage sur résistances) est, à peu d'exceptions près, toujours la même. La dernière partie de la courbe se déterminera en prenant une moyenne entre les différentes courbes correspondant au parcours d'un train.

» Nous avons ainsi déterminé une courbe type comprenant quatre valeurs de l'intensité : $i_1, i_2, i_3, i_4 = 0$, et quatre valeurs correspondantes du temps : t_1, t_2, t_3, t_4 .

» La méthode à suivre va maintenant se comprendre facilement : nous supposons que chacun des n trains en circulation sur le tronçon de ligne considéré trace à un moment quelconque un morceau quelconque de la courbe type considérée et nous nous posons le problème suivant :

» Étant donné un intervalle de temps T , pendant lequel les n trains circulent sur la ligne, pendant combien de temps la valeur de l'intensité sera-t-elle

$$\alpha_1 i_1 + \alpha_2 i_2 + \alpha_3 i_3 + \alpha_4 i_4,$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ étant des entiers répondant à la condition

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = n.$$

» Nous pouvons supposer, par exemple, que le temps T est le temps total du parcours type, de telle sorte que

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4.$$

» Nous pouvons raisonner simplement de la manière suivante :

» Fixons notre attention sur un premier train; celui-ci prendra l'intensité i_1 , pendant le temps t_1 . Si nous envisageons maintenant un deuxième train circulant pendant ce temps t_1 , la valeur la plus probable du temps, pendant lequel il prendra l'intensité i_1 , est la fraction $\frac{t_1}{T}$ de t_1 ; opérant ainsi de proche en proche sur α_1 trains, nous voyons que la durée la plus probable de l'intensité $\alpha_1 i_1$ est la fraction $\left(\frac{t_1}{T}\right)^{\alpha_1}$ du temps T .

» Nous poursuivrons maintenant la même méthode avec des intensités i_2 prises par α_2 autres trains, puis des intensités i_3 prises par α_3 autres trains, enfin des intensités i_4 prises par α_4 autres trains, et nous trouverons ainsi que l'intensité

$$\alpha_1 i_1 + \alpha_2 i_2 + \alpha_3 i_3 + \alpha_4 i_4$$

a été prise pendant la fraction

$$\frac{t_1^{\alpha_1} t_2^{\alpha_2} t_3^{\alpha_3} t_4^{\alpha_4}}{T^n}$$

de T .

» Mais nous pouvons recommencer la même opération en prenant les n trains dans un ordre différent, et obtenir ainsi la même intensité pendant autant de fois la fraction ci-dessus du temps T qu'il y a de manières de prendre dans n courbes semblables à la courbe type : α_1 fois l'intensité i_1 , α_2 fois l'intensité i_2 , α_3 fois l'intensité i_3 , α_4 fois l'intensité i_4 .

» La fraction totale du temps T pendant laquelle le courant total a la valeur $\alpha_1 i_1 + \alpha_2 i_2 + \alpha_3 i_3 + \alpha_4 i_4$ est donc le terme en $t_1^{\alpha_1}, t_2^{\alpha_2}, t_3^{\alpha_3}, t_4^{\alpha_4}$, avec son coefficient même, dans le développement de

$$(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)^n.$$

» L'application d'une telle méthode est extrêmement pénible, comme on va s'en rendre compte par ce qui suit :

» Le nombre des termes du développement de

$$(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)^n$$

est comme on sait

$$\frac{(n+1)(n+2)(n+3)}{1 \times 2 \times 3}.$$

» Si par exemple $n = 25$, ce nombre est de 3276 termes.

» Heureusement le nombre des coefficients différents est moins

grand, le même coefficient étant applicable aux termes

$$t_1^{\alpha_1} t_2^{\alpha_2} t_3^{\alpha_3} t_4^{\alpha_4}, \quad t_1^{\alpha_1} t_2^{\alpha_2} t_3^{\alpha_3} t_4^{\alpha_4}, \quad \dots$$

qui correspondent aux diverses permutations de $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$.

» Il en résulte que le nombre des coefficients différents est égal au nombre N de manière de former la somme n avec quatre nombres entiers, dont 1, 2 ou 3 peuvent être nuls.

» Il est possible d'établir des formules permettant de calculer ce nombre; pour ne pas entrer dans des développements qui nous détourneraient de notre sujet, nous donnerons seulement le résultat pour $n = 25$; dans ce cas, le nombre des coefficients différents est de 185.

» Comme on le voit, la méthode est en général peu accessible à la pratique courante.

» Elle peut permettre de résoudre rapidement quelques problèmes tels que le suivant :

» Quelle est la probabilité pour que tous les trains prennent en même temps leur maximum d'intensité; ou, plus exactement, pendant quelle fraction du temps tous les trains prendront-ils leur maximum d'intensité.

» Cette fraction du temps est représentée par le rapport

$$\left(\frac{t_2}{T}\right)^n.$$

» Si par exemple, toujours pour $n = 25$, $\frac{t_2}{T} = 0,07$, chiffre que nous extrayons d'une étude de ligne métropolitaine, la fraction $\left(\frac{t_2}{T}\right)^n$ correspondra à une durée de moins de 3 secondes pour 10^{22} années. On peut donc dire que, pratiquement, une telle éventualité n'existe pas. Nous aurons toutefois à revenir plus loin sur ce sujet quand nous discuterons la valeur de la méthode.

» Nous avons pu appliquer la méthode précédente à un cas qui présentait une simplification fortuite, provenant de ce que les intensités i_1 et i_3 différaient assez peu pour que l'on pût les confondre. Le nombre des éléments était ainsi réduit à 3 de telle sorte que, pour $n = 25$, comme précédemment, le nombre des termes était de 351 et celui des coefficients de 65.

» Le calcul devenait donc abordable.

» La courbe type avait la forme représentée figure 7.

» Nous avons fait le calcul pour les valeurs de n suivantes :

$n = 3, n = 12, n = 20, n = 32$. La courbe type elle-même correspond à $n = 1$.

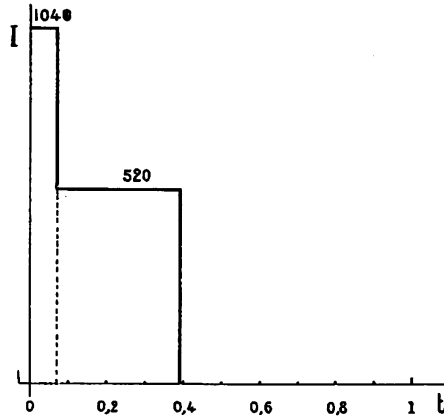


Fig. 7.

- » La figure 8 indique à une échelle arbitraire le résultat du calcul.
- » On peut déduire de ces graphiques un certain nombre de données

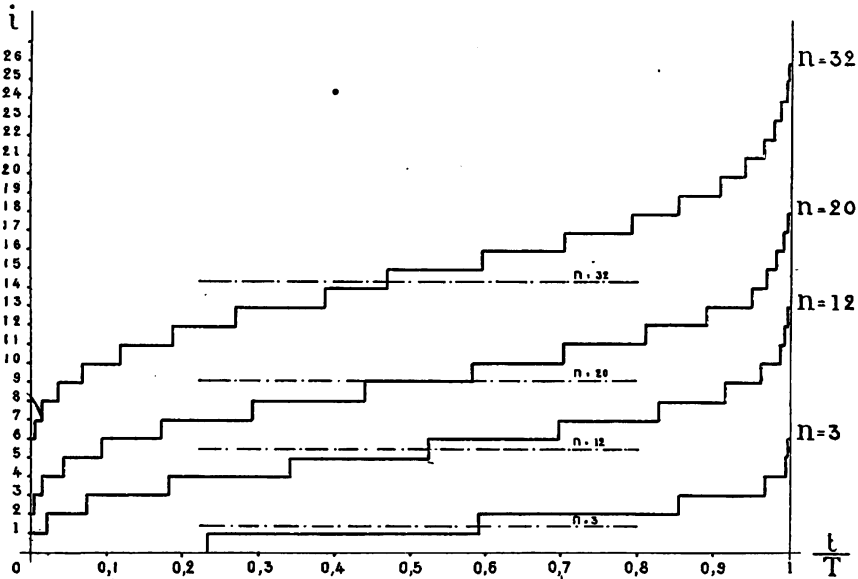


Fig. 8.

intéressantes, qui sont rassemblées sur les courbes de la figure 9.

- » Si l'on se place au point de vue des batteries ou groupes tam-

pons, on a besoin de connaître le rapport $\frac{\Delta I_t}{I_t}$ des écarts de quantité par rapport à la moyenne à cette moyenne elle-même. On voit que

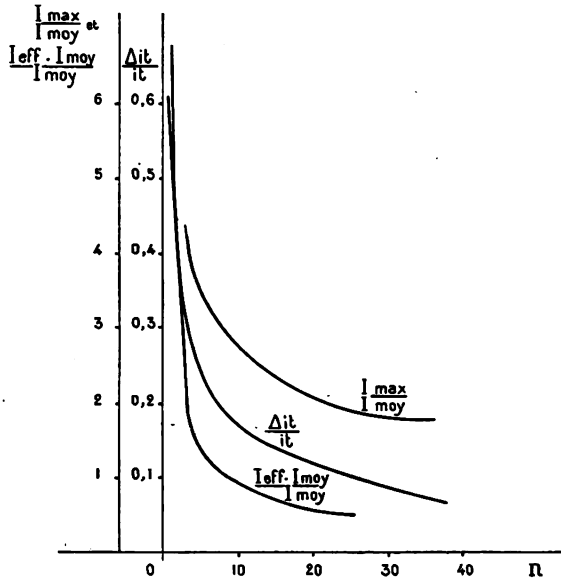


Fig. 9.

ce rapport décroît très rapidement quand le nombre des trains alimentés augmente.

» Au point de vue de l'utilisation générale du matériel, on a besoin de connaître le rapport $\frac{I_{\max}}{I_{\text{moy}}}$ de l'intensité maxima à prévoir à l'intensité moyenne. Théoriquement, l'intensité maxima serait celle qui correspondrait à n fois l'intensité maxima prise par un train. Mais, pratiquement, il est nécessaire de régler les disjoncteurs pour une intensité bien moindre. On peut se rendre compte par l'examen des courbes de la figure 9 que la probabilité de saute du disjoncteur devient rapidement très faible au fur et à mesure que l'on envisage une intensité de réglage plus grande. On pourra donc caractériser cette intensité de réglage en disant qu'elle doit être telle qu'elle ne dure au plus que pendant une fraction déterminée du temps total de marche, $\frac{1}{1000}$ par exemple. C'est ainsi que nous avons choisi ce que nous avons appelé $I_{\max}$ et que nous avons pu tracer la courbe de $\frac{I_{\max}}{I_{\text{moy}}}$ en fonction de n .

» Nous avons de même déterminé l'écart relatif $\frac{I_{\text{eff}} - I_{\text{moy}}}{I_{\text{moy}}}$ entre

l'intensité efficace et l'intensité moyenne. Ainsi qu'on le voit sur la courbe de la figure 9, cet écart diminue rapidement quand le nombre de trains augmente, mais, pour un faible nombre de trains, il est d'un ordre de grandeur suffisant pour qu'il soit utile d'en tenir compte, en particulier dans le calcul des pertes en ligne.

» *Discussion des deux méthodes précédentes.* — La méthode que nous venons de décrire permet donc de mettre en lumière un certain nombre de résultats intéressants obtenus dans des conditions bien comparables. Mais l'intérêt qu'elle présente ne doit pas faire oublier qu'elle n'est pas à l'abri de toute critique, tant s'en faut.

» En effet, elle est basée sur le désordre complet dans la marche des trains et, même, elle ne tient pas compte de ce que, dans la marche d'un train, les périodes correspondant à diverses valeurs de l'intensité se suivent dans un ordre déterminé.

» Ce désordre ne peut pas être complet; il ne faut pas oublier en effet que les trains se suivent sur la ligne, ce qui les oblige, dans une certaine mesure, à régler leur marche les uns sur les autres. De sorte qu'en réalité, cette marche ne fait qu'osciller autour d'un horaire moyen.

» *Conditions favorables aux coïncidences de démarrage.* — Voici une preuve de ce fait qui nous paraît tout à fait typique :

» Supposons une ligne idéale, parcourue par des trains se suivant à intervalles parfaitement réguliers, suivant un horaire rigoureusement le même.

» Supposons, de plus, que cette ligne comporte des stations espacées de telle manière que les temps de parcours d'une station à l'autre soient rigoureusement les mêmes sur toute la ligne.

» Si, de plus, il se trouve que l'intervalle de temps entre deux départs du terminus soit un multiple du temps de parcours entre deux stations, il y aura coïncidence entre les démarrages de tous les trains.

» Si, par exemple, le temps de parcours entre deux stations est de 1 minute et demie et que les départs se fassent toutes les 3 minutes, toutes les 4 minutes et demie, ou toutes les 6 minutes, tous les trains démarreront en même temps.

» Il suffira de modifier légèrement l'intervalle des départs pour que la coïncidence n'existe plus.

» Pratiquement, les conditions nécessaires pour que de telles coïncidences se produisent ne sont jamais rigoureusement réalisées. Mais elles peuvent l'être à peu près, en ce sens que, sur une ligne

métropolitaine, par exemple, les intervalles entre les stations ne s'écartent jamais beaucoup d'une certaine valeur moyenne et que, d'autre part, l'horaire est à peu près régulier. Le phénomène de coïncidence que nous avons signalé plus haut sous sa forme la plus exagérée se présente alors d'une manière atténuée, mais suffisamment nette, et se manifeste par des fonctionnements particulièrement nombreux de disjoncteurs. Nous en avons eu une preuve pratique, il y a quelques années. Le chef de service des sous-stations d'une importante exploitation de traction nous fit part un jour de cette remarque qu'il avait faite que le dimanche les disjoncteurs d'une sous-station fonctionnaient beaucoup plus fréquemment qu'en semaine; alors que, néanmoins, le nombre des trains en ligne était moins grand ce jour-là. Nous eûmes l'idée de comparer, pour l'horaire du dimanche, l'intervalle de temps entre deux départs à l'intervalle de temps moyen entre les démarrages sur la zone desservie par la sous-station, et nous pûmes constater que ces temps étaient très sensiblement multiples l'un de l'autre, ce qui expliquait l'anomalie apparente.

» Ce qui est remarquable et particulièrement important au point de vue de la prédétermination des éléments d'une installation de traction, c'est que l'exagération des pointes de puissance produite par ces coïncidences est parfaitement indiquée d'avance par les diagrammes que l'on peut tracer en superposant les courbes de la puissance en fonction du temps correspondant à chacun des trains desservis.

» Voici (*fig. 10 et 11*) un certain nombre de diagrammes qui correspondent aux données suivantes :

» Il s'agit d'une ligne métropolitaine comportant 30 démarrages pour un parcours aller et retour. On peut par suite s'attendre à des coïncidences de démarrage et à de fortes pointes lorsque le nombre de trains en ligne sera de $\frac{30}{2} = 15$, $\frac{30}{3} = 10$, $\frac{30}{4} = 7,5$, etc.

» La durée d'un parcours aller et retour est d'environ 2600 secondes, y compris les battements en bout de ligne.

» Aux nombres de trains en ligne qui viennent d'être indiqués correspondent par suite des intervalles entre trains de

$$\begin{aligned}\frac{2600}{15} &= 170'', & \text{soit près de } 3'; \\ \frac{2600}{10} &= 260'', & \text{» } 4', 5; \\ \frac{2600}{7,5} &= 340'', & \text{» } 6' .\end{aligned}$$

» De plus, l'intervalle de temps entre deux démarrages est en moyenne de

$$\frac{2600}{30} = 87''.$$

Service a 2 minutes $\frac{1}{2}$

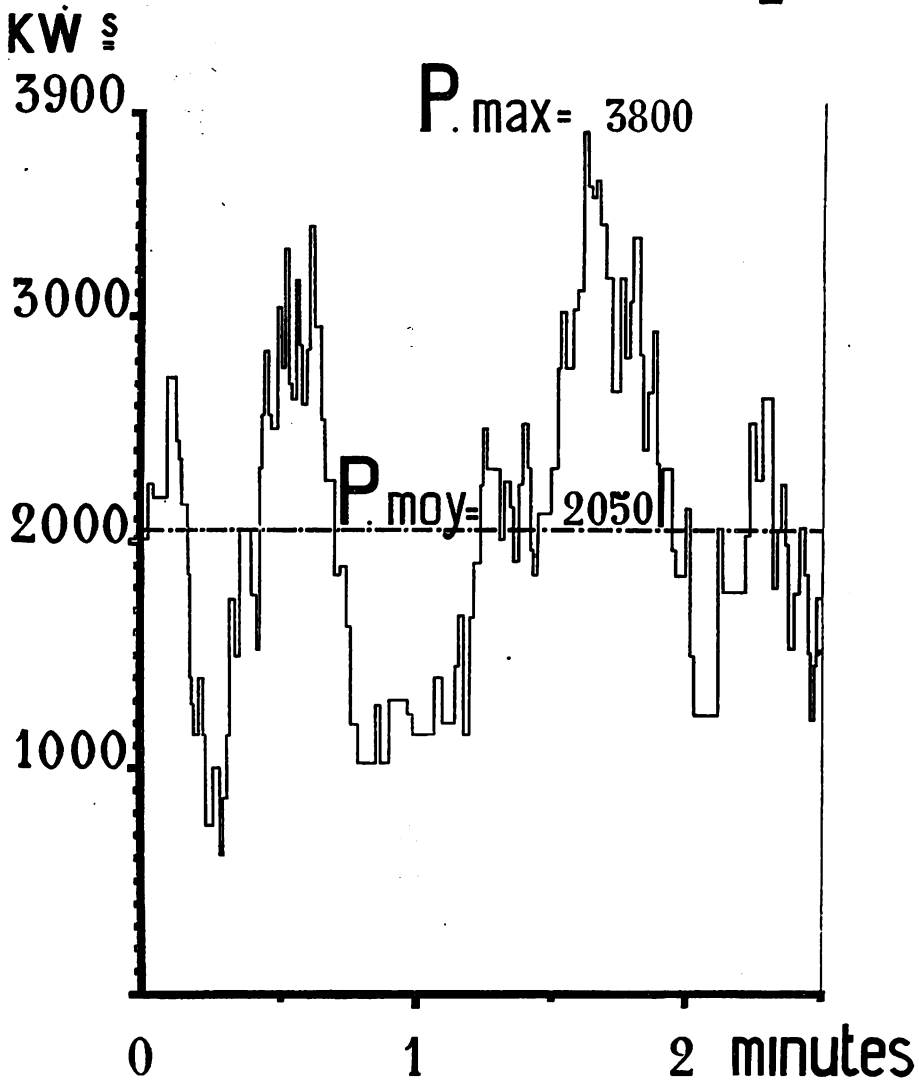


Fig. 10.

» Les courbes (fig. 10), obtenues par superposition pour des

services à 2 minutes et demie, 3 minutes, 4 minutes, 6 minutes, permettent de vérifier la tendance particulière aux fortes pointes pour les services indiqués ci-dessus et une périodicité grossièrement approchée de 90'' (voisine de 87'') pour les pointes.

Service a 3 minutes

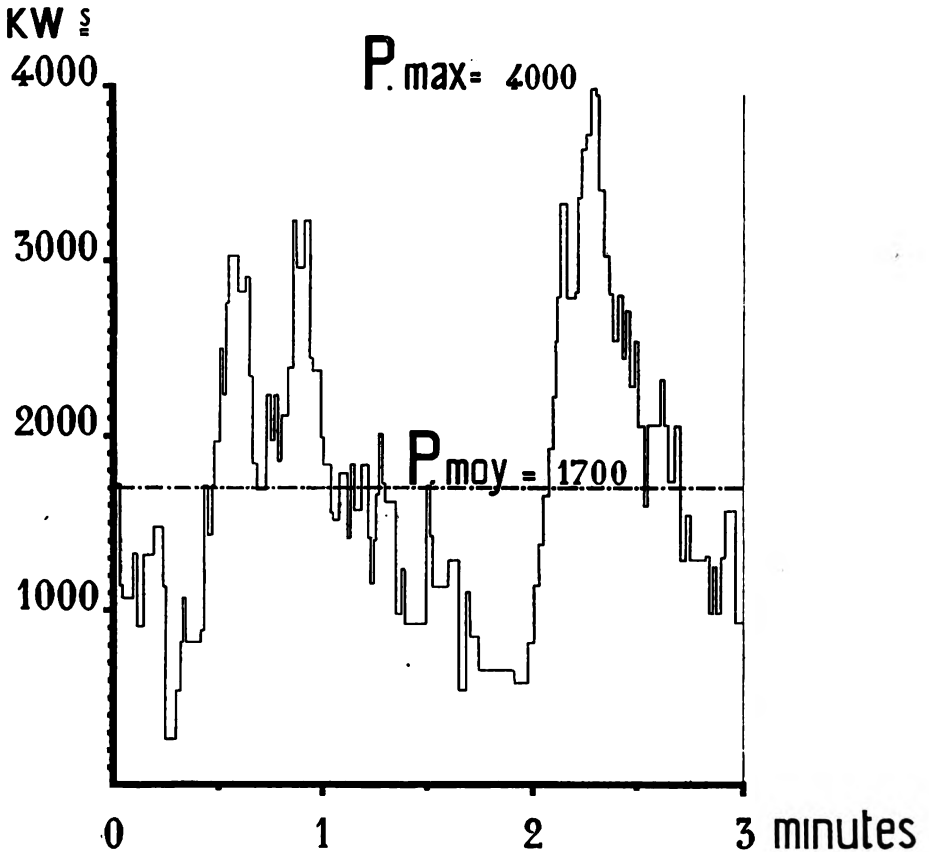


Fig. 10.

» La figure 11 résume les résultats déduits des courbes précédentes. $\frac{P_{max}}{P_{moy}}$ est le rapport de la plus forte pointe à la moyenne. $\frac{\Delta W}{W}$ est le rapport de l'énergie correspondant aux puissances surpassant la moyenne à l'énergie totale.

» Il semble donc qu'en choisissant exprès, à l'avance, les conditions favorables aux coïncidences, on pourra, de la simple inspection des diagrammes, et en se donnant encore une certaine marge

par rapport aux valeurs maxima qu'ils indiquent, prédéterminer assez exactement les valeurs les plus grandes des pointes à prévoir.

» La comparaison de la méthode de superposition et de la méthode de probabilité, dans l'application que nous avons pu en faire

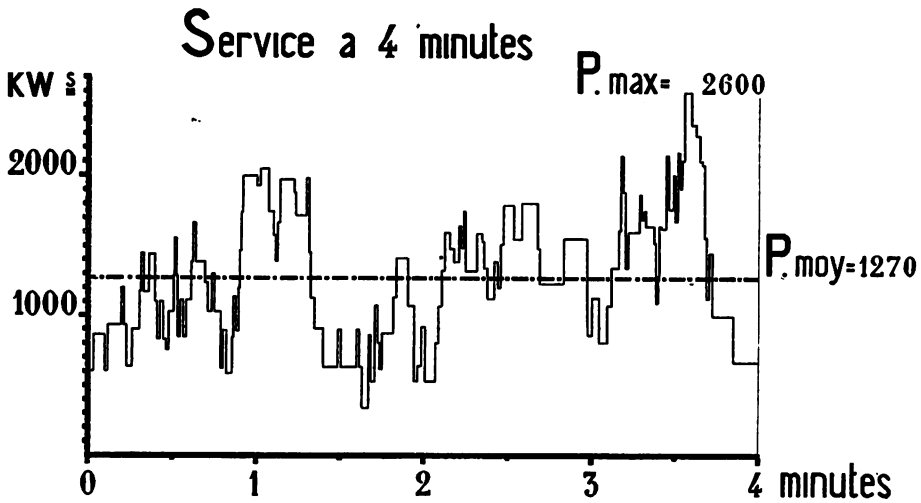


Fig. 10₂.

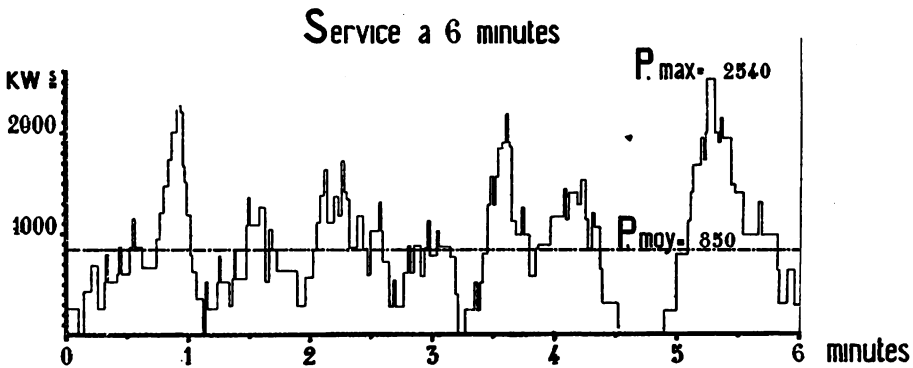


Fig. 10₃.

à titre d'exemple, nous a permis en outre de vérifier que ces deux méthodes paraissent donner des résultats peu différents en ce qui concerne le rapport des écarts d'énergie par rapport à la moyenne.

» Il semble donc que la méthode de superposition, appliquée avec certaines précautions, puisse donner des indications suffisamment approchées. Il n'y a d'ailleurs pas lieu d'en être surpris, car cette méthode indique, en somme, les résultats d'un service moyen autour duquel le service réel effectue des *fluctuations*. Elle est

bien, elle aussi, malgré son apparence rudimentaire, une méthode de probabilité scientifique, même supérieure à celle que nous avons indiquée sous ce nom, puisqu'elle tient compte d'éléments réguliers que l'autre laisse de côté.

» Pour clore cette discussion critique, nous croyons utile de faire remarquer que la constatation qui précède présente un intérêt

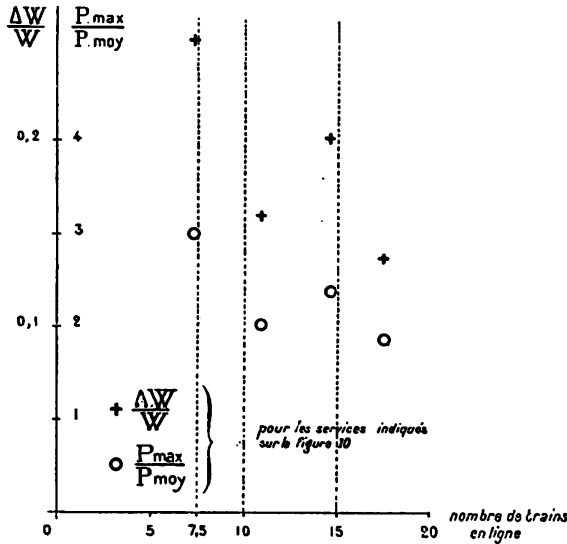


Fig. 11.

assez grand, car il est toujours avantageux d'avoir à donner la préférence à la méthode la plus terre à terre, à celle qui est à la portée de tout le monde.

» Nous nous sommes étendu assez longuement sur le sujet qui précède, qui nous paraît présenter aujourd'hui un intérêt de plus en plus grand. Depuis quelques années, l'industrie de la distribution de l'énergie électrique a fait des progrès considérables, et il est bien rare, à l'heure actuelle, qu'une entreprise de traction ne trouve pas à acheter le courant nécessaire à ses besoins.

» La difficulté est de bien définir la puissance à mettre à la disposition du client, en raison des pointes instantanées dont la valeur commerciale se présente en général sous un jour très différent pour le vendeur et pour l'acheteur. Le client de traction est un client à pointes, mais nous savons que ces pointes s'emboîtent les unes dans les autres d'autant plus parfaitement qu'elles sont plus nombreuses. Nous avons montré, par ce qui précède, que l'on pouvait déterminer assez bien la valeur de cet emboîtement et, par suite,

prévoir assez exactement la puissance dont il est nécessaire de disposer.

TROISIÈME PARTIE.

RÉSEAU DE RETOUR.

» *Réglementation française actuelle.* — En France, les dispositions à donner aux feeders de retour découlent des prescriptions d'un arrêté technique qui impose aux exploitants de tramways la règle dite du *volt kilométrique*, dans les termes suivants :

« La perte de charge dans les voies, mesurée sur une longueur de voie de 1 km prise arbitrairement sur une section quelconque du réseau, ne doit pas dépasser en moyenne 1 volt pendant la durée effective de la marche normale des voitures.

» Aussi longtemps qu'il n'existe pas de masses métalliques dans le voisinage des voies, une perte de charge supérieure aux limites fixées au paragraphe 2 peut être admise, à la condition qu'il n'en résulte aucun inconvénient et, en particulier, aucun trouble dans les communications télégraphiques ou téléphoniques, ni dans les lignes de signaux de chemins de fer. »

» *Intensité moyenne en un point de la ligne.* — La prédétermination des dispositifs nécessaires pour réaliser cette condition exige, en premier lieu, la connaissance de l'intensité moyenne qui circule en chaque point dans les voies. On admettra, bien entendu, dans les calculs, que tout le courant passe par les rails. Dans ces conditions, l'intensité moyenne peut être définie de la manière suivante :

» Considérons (*fig. 12*) un tronçon de voie AB, de longueur l , par-

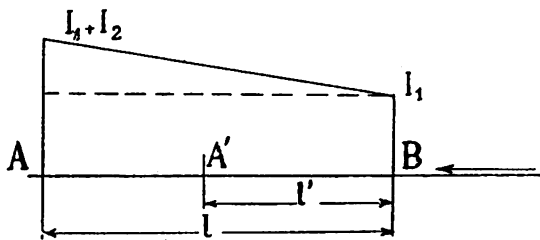


Fig. 12.

courue, à une vitesse moyenne v , par un train absorbant une intensité moyenne I . Nous supposons que le courant est ramené de B vers A de telle manière que la quantité totale d'électricité prise par

le train passe en A. Pendant le parcours AB, cette quantité est

$$\frac{l}{v} I.$$

» Si, sur le tronçon AB, nous prenons un point A' distant de l' de B, la quantité qui passera en A' sera

$$\frac{l'}{v} I.$$

» La quantité qui passe en un point pendant le parcours du tronçon AB par un train est donc proportionnelle à la distance de ce point à B.

» Cette conclusion reste vraie pour la quantité totale d'électricité prise par les différents trains qui circulent sur le tronçon AB pendant une période. Par suite, la part d'intensité moyenne en un point due au courant utilisé sur le tronçon AB est également proportionnelle à la distance de ce point à B.

» Si donc il arrive, en B, I_1 ampères, venant d'un tronçon voisin, si l'intensité moyenne absorbée dans le tronçon AB est I_2 ampères, l'intensité en A est $I_1 + I_2$ ampères.

» L'intensité, en un point intermédiaire, s'obtiendra en admettant que la variation d'intensité depuis I_1 jusqu'à $I_1 + I_2$, en fonction de la distance, est linéaire.

» Le rapport $\frac{I_2}{l}$ qu'on peut appeler *intensité kilométrique*, si l est exprimé en kilomètres, se déduit très simplement du projet de traction ou de la consommation spécifique, d'une part, et, d'autre part, de l'horaire moyen effectif choisi pour base de la détermination des feeders, d'après les termes de l'arrêté. Le Tableau ci-contre indique la marche du calcul.

» Pratiquement, sauf dans le cas où les voies comportent des sections alternées à voie unique et double voie ou des types de rails très différents, la plus grande perte de charge linéaire se trouve au voisinage des pieds d'attache des feeders, et les mesures se font en général sur 1 km de voie ayant son origine à un de ces pieds d'attache.

» *Détermination des pieds d'attache des feeders. Intensité limite admissible dans les voies.* — La détermination des pieds d'attache des feeders se fait très simplement d'après la considération de l'intensité limite admissible dans les voies.

TABLEAU DE CALCUL DES FEEDERS.

SOUS-STATION.	LIGNE OU TRONÇON DE LIGNE.	LONGUEUR: L kilomètres)	CONSUMATION spécifique w (watt-heur) (tonne.km)	DURÉE du service T (heures)	NOMBRE de trains par heure F .	KILO- MÈTRES- TRAIN: par jour $2 L F T$.	TONNAGE des trains M (tonnes).	KILOWATT- HEURES journaliers $H' = \frac{2 L F T w M}{100}$	PUISSANCE moyenne $P = \frac{H'}{T}$ (kilowatts).	INTENSITÉS totale sous E rails $I = \frac{P}{E}$ (ampère-$\frac{1}{2}$). kilométrique $i = \frac{I}{L}$.

» En effet, si l'on pouvait admettre que l'intensité moyenne dans la voie reste la même le long de 1 km, et si la voie avait partout la même composition le long de ce kilomètre, une chute de tension déterminée correspondrait également à une intensité déterminée d'avance, uniquement d'après le type de rails employé.

» Ainsi, en supposant que la résistivité de l'acier soit de 17 microhms : cm et en admettant une majoration de 10 pour 100 de la résistance pour tenir compte des joints, les intensités limites admissibles I_0 seraient les suivantes, en désignant par u_1 la perte de charge kilométrique admise :

Voie simple 20 kg.	28 u_1
Voie simple 43 kg.	60 u_1
Voie simple 50 kg.	70 u_1
Voie double 50 kg.	140 u_1

En général,

$$I_0 = 0,7 P_1 u_1,$$

P_1 étant le poids de 1 m de l'ensemble des rails.

» Mais l'intensité ne resterait la même le long de 1 km que si la circulation des trains y était nulle.

» L'intensité limite est donc en outre fonction de l'intensité kilométrique.

» Si l'on se reporte à ce que nous avons vu plus haut, la perte de charge sur un tronçon de 1 km, constitué par une voie ayant une résistance kilométrique ρ_1 , recevant un courant I_1 d'un tronçon voisin et comportant une intensité kilométrique i_1 , a pour valeur

$$\rho_1 \left[I_1 + \frac{i_1}{2} \right]$$

» Elle doit avoir au plus la valeur u_1 , donc

$$I_1 + \frac{i_1}{2} = \frac{u_1}{\rho_1}.$$

» L'intensité limite dans le tronçon considéré est d'autre part égale à $I_1 + i_1$.

» Si l'intensité avait été la même le long du kilomètre considéré, elle aurait dû avoir au plus la valeur $I_0 = \frac{u_1}{\rho_1}$. Par suite,

$$I_1 + i_1 = I_0 + \frac{i_1}{2}.$$

» L'intensité limite peut donc, en réalité, dépasser de $\frac{i_1}{2}$ la valeur I_0 indiquée dans le Tableau qui précède.

» $\frac{i_1}{2}$ atteint une valeur relative importante pour les lignes chargées telles que celles des tramways des grandes villes ou des métropolitains.

» Il n'est donc pas indifférent de baser la mesure de la perte de charge sur 1 hm ou sur 1 km et l'on peut dire, à ce point de vue, qu'une modification du règlement tendant à imposer la mesure de la perte de charge sur 1 hm constituerait non pas une simple différence d'interprétation, mais une aggravation très notable des prescriptions en vigueur. Aggravation sans intérêt pratique d'ailleurs. En effet, ce sont les chutes de tension de l'ordre de 1 volt qu'il importe de réduire et non pas celles de l'ordre de 1 dixième de volt. C'est donc le kilomètre qu'il est finalement intéressant de considérer.

» Les points de la voie où doivent être attachés les feeders de retour sont ceux où l'intensité moyenne atteint la valeur limite déterminée par les considérations précédentes.

» La figure 13 donne l'exemple d'une application de la méthode que nous venons d'indiquer.

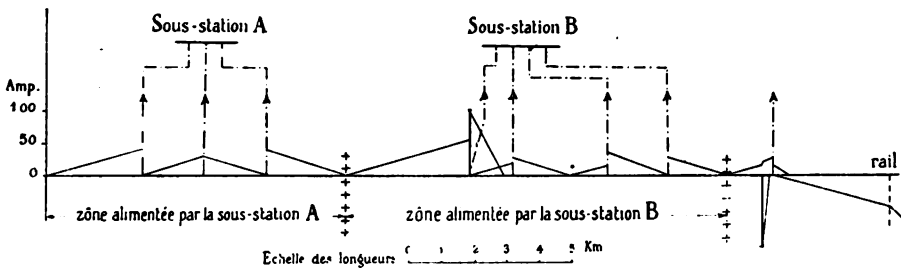


Fig. 13.

» On a en général intérêt, pour réduire la longueur des feeders, à ramener les intensités vers les sous-stations comme l'indique cette figure. Cette règle n'est d'ailleurs pas sans exceptions.

» *Réglage de l'intensité dans les feeders.* — Il nous reste à indiquer comment les dispositions mêmes des feeders peuvent obliger les intensités à se distribuer en moyenne suivant le diagramme qu'on s'est ainsi imposé d'avance. Il s'agit de donner à chaque feeder une résistance telle que la répartition des intensités dans le circuit soit celle indiquée sur le diagramme. Ce problème ne présente pas de difficultés. On n'a qu'à commencer le calcul par le

feeder le plus long, en s'imposant une chute de tension déterminée entre l'extrémité de la section de ligne considérée et la barre du tableau. Mais, pratiquement, l'application de la méthode se trouve grandement facilitée par cette remarque qu'en général la chute de tension dans les feeders est suffisamment grande par rapport à la perte de charge dans les rails pour qu'on puisse négliger cette dernière.

» En traitant des exemples simples, on peut se rendre compte que, pratiquement, lorsque, dans un réseau, il n'existe pas de tronçon comportant plus de deux feeders, l'écart entre l'intensité réelle et celle calculée, en négligeant la résistance des voies, ne dépasse pas 10 pour 100 dans les cas les plus défavorables. Cette précision est très suffisante dans ce genre de calculs en raison de l'inexactitude de la plupart des données.

» On peut ainsi établir très rapidement les sections de tous les feeders en dressant d'avance un graphique tel que celui de la figure 14 qui, pour une chute de tension donnée dans les feeders,

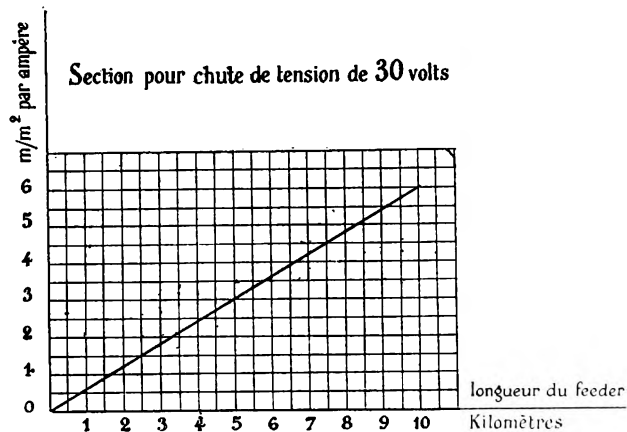


Fig. 14.

porte en abscisse la longueur du feeder et en ordonnée la section par ampère qu'il convient de lui donner.

» Si un feeder est très court, le calcul ainsi fait peut conduire à une section trop faible au point de vue de l'échauffement. Dans ce cas, on donne au feeder la section qui convient à ce point de vue, et l'on intercale une résistance en série pour compléter la chute de tension imposée.

» On se sert en général de cette résistance dite *de retour direct* pour régler à une valeur convenable les intensités passant dans les feeders; à cet effet, la résistance est pourvue d'un certain

nombre de bornes de connexion qui permettent d'en faire varier la valeur.

» *Sections à donner aux feeders.* — Pour déterminer les sections à donner aux feeders, on applique la règle de Kelvin, en tenant compte de la condition spéciale relative à l'égalité des chutes de tension dans chaque feeder. Avec les prix d'avant-guerre, on se trouvait en général dans de bonnes conditions pour une chute de tension moyenne dans les feeders égale à 30 volts, dans des réseaux d'une étendue telle qu'ils pussent être convenablement alimentés à 600 volts sans dépense anormale de cuivre.

» *Chute de tension totale dans les voies.* — Il peut être intéressant de déterminer la chute de tension totale le long d'un tronçon de voie, l'influence que les courants circulant dans les rails peuvent exercer sur les circuits de signaux dépendant de cette chute de tension.

» L'application de la règle du volt kilométrique conduit au résultat représenté par la figure 15, où $\frac{u}{u_1}$ représente le rapport de

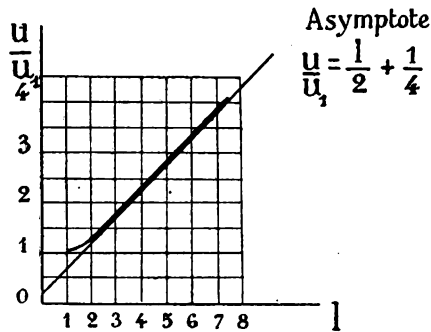


Fig. 15.

la chute de tension dans le tronçon de voie alimenté par un feeder au nombre de volts admis par kilomètre, l la longueur du tronçon. On voit que u tend très rapidement vers $\left(\frac{l}{2} + \frac{1}{4}\right)u_1$. Ainsi, dans un tronçon de voie de 4 km pour lequel on appliquerait la loi du volt kilométrique, la chute de tension serait très peu supérieure à 2,25 volts.

» *Autres méthodes de calcul des feeders. Emploi des survolteurs.*

— La méthode que nous avons indiquée pour la répartition des

intensités est la plus économique. Elle ne donne qu'une équipotentialité approximative des pieds d'attache. Pour obtenir celle-ci, en moyenne, il faudrait, dans un tronçon compris entre deux feeders, partager également les intensités entre ceux-ci. Enfin, pour obtenir l'équipotentialité à chaque instant, il faudrait munir chacun des feeders ainsi déterminés de survolteurs.

» L'emploi de survolteurs est onéreux puisqu'il superpose aux pertes dans les feeders celles dues à leur fonctionnement. De plus, il nécessite un réglage délicat.

» Nous pensons qu'en général on peut s'en tenir à la méthode que nous avons décrite et qui nous a donné entière satisfaction dans de nombreux cas ⁽¹⁾.

» *Conception simple et générale du réseau de retour.* — Quelle que soit d'ailleurs la méthode que l'on suive, quelle que soit même la réglementation imposée, la condition d'équipotentialité au moins approximative des pieds d'attache des feeders et le fait que la chute de tension dans ceux-ci est grande par rapport à celle qui se produit dans les rails (leur rapport est en général de l'ordre de 10) conduisent à se représenter un réseau de retour comme constitué par deux conducteurs dont les différents points sont à de faibles différences de potentiel : la barre du tableau et les rails, séparés par des conducteurs résistants : les feeders. Cette conception simple permet de se rendre un compte exact de toutes les particularités du calcul des feeders de retour. Elle fait bien voir pourquoi on obtient à volonté la répartition que l'on désire des intensités dans les voies par de faibles variations de résistance des feeders. C'est un ordre d'idées tout spécial et très distinct de celui dans lequel on examine en général la question du retour du courant.

QUATRIÈME PARTIE.

RÉSEAU D'ALIMENTATION.

» De même que le réseau de retour, le réseau d'alimentation d'un tramway présente quelques particularités qui le distinguent d'une ligne électrique quelconque, et qui sont les suivantes :

» En premier lieu, la section minima de la ligne de prise de cou-

⁽¹⁾ Cette méthode était déjà en application à l'Omnium lyonnais il y a 14 ans, sous la direction de M. Petit, administrateur délégué, et de M. Hanquet, ingénieur principal de cette Société.

rant est déterminée par des conditions mécaniques. Pendant longtemps on n'a employé que du fil de 50 mm^2 ou 54 mm^2 de section, ce qui, pour une ligne à double fil, conduit à une section totale de 100 mm^2 . Aujourd'hui on emploie souvent des sections de fil de 75 mm^2 ou 100 mm^2 et l'expérience du Nord-Sud montre qu'il n'y a pas de difficultés à élever la section jusqu'à 150 mm^2 . En s'en tenant au simple point de vue mécanique, on peut dire que pour une ligne très chargée la section de 50 mm^2 ou 54 mm^2 est un peu faible, et qu'il peut être utile d'employer des conducteurs de 75 mm^2 pour réduire les chances de chutes de ligne.

» Nous pouvons donc considérer que le minimum de section d'une ligne à double fil est de 100 mm^2 pour une ligne peu chargée, de 150 mm^2 pour une ligne chargée.

» Dans ces conditions, il est bien évident que les données les plus économiques seront celles qui correspondront à l'emploi de la ligne de travail comme unique conducteur d'alimentation, sous cette réserve toutefois que cette ligne de travail soit utilisée elle-même dans les conditions d'économie maxima.

» Ces conditions peuvent être déterminées de la manière suivante :

» On peut se rendre compte tout d'abord que, la section de la ligne étant donnée, les conditions d'économie maxima correspondent à une intensité totale déterminée dans chaque tronçon de ligne.

» Dans les conditions d'avant-guerre, cette intensité était assez considérable, et permettait, dans bien des cas, une bonne utilisation de la ligne aérienne; mais la limite d'utilisation de celle-ci est en général imposée par des considérations de chute de tension, les équipements de traction n'ayant un fonctionnement satisfaisant qu'entre certaines limites de différence de potentiel.

» En tenant compte de ces deux ordres d'idées, on arrive à des relations donnant pour chaque cas concret les valeurs optima de la tension à adopter et de la distance entre points d'alimentation. Nous ne reproduisons pas ici le calcul qui conduit à ces relations et qui est un peu long, ni ces relations elles-mêmes, qui n'ont plus beaucoup de valeur actuellement, en raison des variations rapides auxquelles sont soumis maintenant les facteurs économiques qu'elles comportent.

» Voici quelles étaient, avant la guerre, les conclusions de l'étude en question : en s'imposant la tension de 600 volts, on trouvait pour des conditions normales de tramways urbains, comme tonnage et comme consommation, et pour un service comportant de

quatre à cinq trains à l'heure dans chaque sens, que la longueur d'un tronçon alimenté en un seul bout devait être de 6 km.

» On pouvait en conclure que la tension de 600 volts était bien adaptée en général aux tramways urbains et suburbains. Mais, dès que la fréquence des départs était notablement plus réduite, une augmentation de tension s'imposait. Tel était et tel est encore le cas de certaines lignes suburbaines de tramways.

» Le sens de ces conclusions n'est certainement pas changé à l'heure actuelle.

» Nous avons indiqué l'intérêt de l'élévation de la tension en nous plaçant au point de vue du réseau d'alimentation dont les conditions d'installation sont soumises aux règles ordinaires imposées aux canalisations électriques.

» Si nous avons tenu compte du réseau de retour, nous aurions trouvé que l'élévation de la tension présenterait de l'intérêt dans un nombre de cas encore plus grand pour réduire les dépenses d'installation de ce réseau. Mais ces dépenses font partie d'une catégorie spéciale, puisqu'elles sont nécessitées par l'intérêt des tiers et l'on peut concevoir des cas ou des systèmes où elles n'aient pas à intervenir; c'est pourquoi il nous a paru plus opportun de baser notre argumentation sur le seul réseau d'alimentation.

» L'emploi de courant continu à tension plus élevée que 600 volts a été le plus souvent envisagé pour des installations de chemin de fer; il nous a paru utile de faire ressortir qu'il serait également intéressant dans certains cas pour des installations de tramways, dans lesquelles l'expérience en est plus abordable.

CINQUIÈME PARTIE.

QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR LA RÉCUPÉRATION.

» *Énergie réellement récupérable.* — Dans la première Partie de cette étude, nous avons désigné l'énergie dépensée dans les rampes et pour la mise en vitesse sous le nom d'*énergie récupérable*, parce que la partie de l'énergie vive qui est absorbée par les freins mécaniques pourrait être récupérée et que, d'autre part, une partie de l'énergie dépensée dans un sens de marche pour franchir les rampes pourrait être également utilisée dans l'autre sens. Mais on ne peut récupérer réellement qu'une fraction de ces deux dépenses d'énergie.

» En effet, pour qu'une pente oblige à freiner, il faut que l'effort

moteur qu'elle crée dépasse l'effort résistant dû au frottement de roulement. Mais cette condition n'est pas suffisante, car, même lorsqu'elle est remplie, l'application des freins ne devient nécessaire que lorsque l'accélération due à la pente a engendré une vitesse supérieure à la limite admissible. Ces conditions, souvent remplies sur les lignes de montagne, le sont plus rarement sur les lignes métropolitaines.

» Au point de vue électrique, diverses circonstances viennent encore réduire la fraction récupérable de l'énergie dépensée.

» En premier lieu il faut tenir compte des pertes des moteurs pendant les périodes de récupération. D'autre part, le freinage en récupération jusqu'à l'arrêt, qui paraît particulièrement désirable pour un métropolitain, exige l'emploi de groupes régulateurs accessoires pour maintenir l'équilibre des forces électromotrices entre les moteurs travaillant à tension variable et le réseau qui fournit une tension constante. Ces groupes, dont la puissance totale est, à tout le moins, du même ordre de grandeur que celle de l'ensemble des moteurs, ont des pertes importantes. Ils permettent, il est vrai, de supprimer l'emploi des résistances pendant le démarrage, mais l'économie qui en résulte ne fait que compenser partiellement le supplément de consommation dû à leurs pertes.

» Enfin l'emploi des moteurs pendant des périodes où ils tournent sans courant dans les systèmes sans récupération, oblige à augmenter la puissance et par suite les pertes et le poids de ceux-ci. Les machines accessoires ont également un poids plus considérable que les résistances qu'elles permettent de supprimer. L'augmentation de poids mort doit donc réduire sensiblement l'économie due à la récupération.

» En tenant compte de ces différentes circonstances, sauf de l'accroissement de poids mort, voici quel serait à peu près le bilan de la consommation de la ligne métropolitaine à profil moyen envisagée plus haut si la récupération était employée, avec groupe régulateur monté en survolteur ou en transformateur (Tableau II).

» Sur une ligne de chemin de fer autre qu'une ligne de montagne ou particulièrement accidentée, la fraction d'énergie récupérable serait encore plus faible que sur une ligne métropolitaine.

» On voit donc que, lorsqu'on emploie un groupe rotatif dans lequel toute l'énergie est transformée, il n'y a pas à compter sur une économie réelle. L'emploi des moteurs pour le freinage ne présente plus alors que l'intérêt de réduire les dépenses d'entretien dues à l'emploi des freins mécaniques. Ce serait à une expérience prolongée de montrer que cette économie n'est pas compensée

TABLEAU II.

Consommation correspondant à la récupération jusqu'à l'arrêt
sur une ligne métropolitaine moyennement accidentée.

		Avec survolteur.			Avec transformateur.		
		Consommation spécifique (w-h par tonne-km.).	Pour 100 de l'énergie utile non récupérable.	Consommation spécifique (w-h par tonne-km.).	Pour 100 de l'énergie utile non récupérable.		
Énergie mécanique à la jante des roues.	Énergie utile non récupérable.	12,3	83,8	12,3	83,8		
	Énergie utile en partie récupérable.	2,4	16,2	2,4	16,2		
		14,7	100	14,7	100		
		7,2	49	7,2	49		
Pertes et consommations accessoires électriques.	Total de l'énergie utile en partie récupérable.	1	6,8	1	6,8		
		8,2	55,8	8,2	55,8		
		22,9	155,8	22,9	155,8		
TOTAL GÉNÉRAL.	Énergie utile totale	8,7	50,2	8,7	50,2		
	Pertes dans les moteurs.	11,4	77,5	19	129,5		
	Pertes dans les groupes régulateurs.	1,5	10,2	1,5	10,2		
	Éclairage et compresseurs.	1,4	9,5	1,4	9,5		
	Pertes en ligne.						
Économie par rapport au démarrage sur résistances sans récupération.	Total des pertes et consommations accessoires électriques.	23	156,4	30,6	208,4		
		45,9	312,2	53,5	364,2		
		8,6		1,0			
Soit, en pour 100 de l'énergie totale consommée dans le cas du démarrage sur résistances sans récupération.		15,8 pour 100		1,8 pour 100			

Énergie électrique à la sortie des sous-stations.

par une dépense supplémentaire d'entretien des moteurs et de l'équipement électrique.

» L'emploi d'un groupe survolteur permet au contraire, sur une ligne métropolitaine, d'escompter une économie notable d'énergie. Il n'est pas sûr que cette économie permette d'amortir les frais de transformation du matériel.

» Mais, principalement lorsque l'énergie est d'origine thermique, ce qui est le cas le plus fréquent à l'heure actuelle, l'intérêt général impose à chacun des efforts soutenus pour réduire les consommations inutiles. Les compagnies de traction ne peuvent donc se désintéresser de la question de la récupération. Il est peu probable toutefois, en raison de la complexité de la question et des frais considérables qu'une transformation réellement efficace entraînerait, qu'elles puissent aboutir à un résultat vraiment intéressant avant que les efforts qui seront faits pour développer l'utilisation de toutes les ressources d'énergie de notre pays n'aient porté leur fruit.

» Remarques sur certaines particularités de fonctionnement des moteurs de traction en récupération.

» La question de la récupération ne comporte pas seulement d'ailleurs des difficultés d'ordre économique.

» Il y a lieu, en particulier, de faire quelques remarques sur certaines conséquences possibles du principe même de la récupération en courant continu :

» Lorsqu'on emploie des moteurs à caractéristique shunt ou à excitation séparée restituant directement à la ligne l'énergie de freinage, s'il vient à se produire une baisse brusque de tension ou un court circuit en ligne, les moteurs, liés rigidement aux essieux, participant de l'énergie considérable du train, le courant et l'effort de freinage atteignent aussi brusquement une valeur exagérée. Il peut en résulter des inconvénients graves, tant au point de vue électrique qu'au point de vue mécanique. Ce danger a fait renoncer en général à l'emploi du courant continu pour les lignes à crémaillère, sur lesquelles la récupération s'impose plus encore que sur les lignes à faibles pentes. Il est arrivé, par suite des circonstances que nous venons de signaler, que sur des locomotives à crémaillère pourvues de moteurs shunt à courant continu, un incident d'ordre électrique sur la ligne a provoqué un effort de freinage brutal et le désengrènement de la roue dentée.

» Le danger paraît exister aussi pour les lignes à adhérence, mais il est certainement moins grand, l'effort ne pouvant dépasser

certaines limites déterminées par le glissement des roues sur les rails.

» Cet inconvénient est bien spécial au courant continu, il n'est pas à redouter dans l'emploi des moteurs d'induction. Dans ce cas, en effet, il ne suffit pas d'une baisse de tension pour provoquer la marche en génératrice asynchrone ou pour faire croître le couple résistant, si cette marche est déjà réalisée. Il faut, en plus, une baisse de fréquence importante; un simple incident de ligne, par exemple, ne suffit donc pas à produire une variation brusque de l'effort de freinage. De plus, les variations de fréquence qui font intervenir l'inertie des machines génératrices se produisent, en général, avec une soudaineté beaucoup moins grande que les variations de tension qui résultent principalement de phénomènes d'ordre électrique.

» Enfin, l'effet des variations de fréquence dans la récupération par moteurs d'induction ne peut être comparable à celui des variations de tension dans la récupération par moteurs shunt à courant continu. Cela résulte de ce que le moteur d'induction n'est pas autoexcitateur. Pour la même raison, un court circuit en ligne n'a d'autre effet sur les moteurs d'induction que de supprimer l'effort de freinage.

» En fait, malgré la difficulté particulière qui se présente parfois de trouver la charge devant servir de contre-partie à l'énergie récupérée, le freinage récupérateur en courant triphasé est employé couramment avec succès depuis nombre d'années sur un grand nombre de lignes à forte déclivité, tant à adhérence simple qu'à crémaillère, et donne l'impression d'une sécurité parfaite.

» Ainsi que nous l'avons vu plus haut, c'est l'autoexcitation qui est la cause essentielle du risque de freinage brutal par le moteur shunt à courant continu. Tout système permettant la récupération sans autoexcitation échappera donc à cet inconvénient. Signalons en passant que le moteur monophasé à collecteur muni du dispositif de récupération indiqué par M. Behn-Eschenburg ⁽¹⁾, et qui est mis à l'abri de l'autoexcitation, semble jouir de la même immunité à ce point de vue que le moteur d'induction. Ce dispositif, qui permet le freinage récupérateur jusqu'à l'arrêt, paraît donc constituer un grand progrès à l'actif de la traction par courant monophasé.

» Nous terminerons par une dernière remarque sur les conditions d'emploi du freinage récupérateur. La récupération peut être

(1) *R. G. E.* du 7 décembre 1918. Voir également M. LATOUR, *R. G. E.*, 8 mars 1919.

envisagée à deux points de vue différents, suivant qu'il s'agit de restituer à la ligne l'énergie dépensée pour retenir un train en pleine marche sur une longue pente, ou qu'on veut provoquer l'arrêt, en récupérant l'énergie de freinage.

» C'est au premier cas de récupération que répond actuellement aussi bien que possible le système triphasé, et c'est pourquoi ce système est particulièrement bien adapté aux lignes de montagne. Mais il ne répond pas au second cas, alors que le courant continu peut se prêter, moyennant l'emploi d'un survolteur, au freinage jusqu'à l'arrêt, particulièrement intéressant pour un métropolitain.

» Il n'est pas inutile de rechercher les raisons fondamentales pour lesquelles le système triphasé ne permet pas de freiner jusqu'à l'arrêt. Nous avons par avance répondu à cette question dans un article paru le 6 septembre dernier dans la *Revue générale de l'Électricité*. Le moteur triphasé d'induction est un moteur quasi synchrone et nous savons que l'asynchronisme pur que doit présenter un moteur freinant jusqu'à l'arrêt ne peut être réalisé que par l'emploi d'appareils pourvus de commutateurs. Cette condition est bien remplie par les machines à courant continu; elle l'est aussi par le système de récupération par moteur série monophasé de M. Behn-Eschenburg; elle ne pourrait l'être en triphasé qu'au prix de complications qui ôteraient au système la simplicité et la sécurité de fonctionnement qui en sont les avantages essentiels.

» Nous appelons l'attention sur ce point de vue, car il peut n'être pas inutile de constater que, si la question capitale de la récupération n'a pas fait jusqu'ici tous les progrès qu'on était en droit de souhaiter, cela peut tenir à des causes profondes et non pas à un simple défaut de mise au point.

» Je suis arrivé, Messieurs, au terme de cette étude, et je m'excuse d'avoir retenu si longtemps votre attention sur des sujets peu séduisants par eux-mêmes et dont le principal intérêt provient de la grande importance des problèmes généraux auxquels ils se rapportent.

» Je souhaite que les grands projets d'application de la traction électrique aboutissent prochainement à des réalisations dignes de notre pays. Je le souhaite d'autant plus que j'ai consacré déjà 20 ans de mon existence à cette industrie. Me sera-t-il permis de rappeler que, tout frais émoulu des séduisantes leçons de M. Janet, j'ai débuté dans la carrière en collaborant, sous les ordres de M. Mazen, à l'électrification de la ligne des Invalides à Versailles. Il m'est particulièrement agréable de terminer cette Communica-

tion en unissant dans ces souvenirs lointains les noms du directeur de notre École et du Président de notre Société. »

M. le PRÉSIDENT. — « A part les points de vue originaux qu'elle contient, ce qui fait la valeur particulière de la communication de M. Guéry, si clairement exposée, c'est qu'elle est le résultat de l'analyse d'un esprit exact et constamment contrôlé par le contact direct d'un grand nombre d'années avec un champ d'expérience de premier ordre.

» Ce travail est donc essentiellement fait pour servir et il a été visiblement fait dans ce but.

» Les Américains publient souvent des études de ce genre sur différentes questions; il serait à souhaiter que l'exemple de M. Guéry soit suivi plus souvent.

» Remercions donc vivement M. Guéry. »

MESURES ÉLECTRIQUES EN HAUTE FRÉQUENCE.

M. LÉON BRILLOUIN. — « Messieurs, je veux vous présenter, non pas un exposé complet des méthodes de mesure en haute fréquence, mais un résumé de quelques méthodes nouvelles dans ce domaine. Les mesures de haute fréquence ont fait l'objet, pendant la guerre, de nombreux travaux à la Radiotélégraphie militaire sous la haute direction du général Ferrié. Un des premiers et des principaux auteurs en fut M. Armagnat, dont nous avons eu tous à déplorer récemment la brusque disparition. Il fut pendant toute la guerre un collaborateur extrêmement dévoué et habile de la Télégraphie militaire, où il assumait la direction du Laboratoire de mesures de T.S.F. Avec le sens aigu de l'expérimentation, et la recherche incessante de progrès, qui faisaient ses qualités si remarquées, il apporta dans le domaine des mesures de T.S.F. de nombreuses innovations de grande importance.

» Ses travaux très remarquables sur ces sujets difficiles ne furent pas publiés, et firent seulement l'objet de quelques Notes à la Télégraphie militaire. M. Armagnat rédigea d'ailleurs les principaux résultats dans les six leçons qu'il fit l'an dernier à l'École de T.S.F., créée par le général Ferrié. Ces leçons, qui sont un modèle d'exposition, seront, je l'espère, publiées.

» J'ai l'intention, dans cette conférence, de vous résumer rapidement ses travaux, trop heureux de rendre ainsi un juste hommage à la mémoire de l'ancien secrétaire général de la Société des Électriciens.

» J'aurai aussi à citer à plusieurs reprises les travaux importants de MM. Abraham et Bloch, en particulier sur le multivibrateur et les mesures de résistance des bobines.

» Je citerai aussi M. Boucherot, qui fit construire un petit alterateur de haute fréquence spécialement approprié aux mesures de laboratoire, et qui s'est montré très pratique à l'emploi.

» Je commencerai par l'exposé des travaux de M. Armagnat sur le radiogoniomètre, pour terminer par les mesures de longueurs d'onde, qui sont une des questions les plus importantes en haute fréquence.

» *Le radiogoniomètre.* — Le radiogoniomètre est un instrument de mesures spécial à la T.S.F. Son but est la détermination précise

de la direction de propagation d'une onde de T.S.F. à un endroit donné.

» Essentiellement, le radiogoniomètre se compose d'un cadre mobile, tournant autour d'un axe vertical. La réception dans ce cadre est maxima quand le cadre est orienté perpendiculairement au champ magnétique. Mais ce que l'on observe de préférence, c'est l'extinction de la réception lorsque le cadre est dans la direction du champ magnétique. Cette extinction est très nette. La direction de propagation des ondes est perpendiculaire à celle du champ magnétique.

» La réception dans un cadre orienté à l'angle α est proportionnelle à $H \sin \alpha$.

» Le diagramme qui donne, en coordonnées polaires, l'intensité

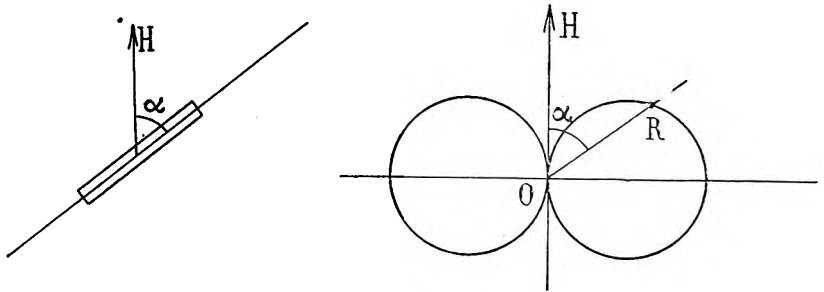


Fig. 1.

de la réception en fonction de l'angle α se compose de deux cercles tangents.

» La réception sur cadre n'a été possible que lorsqu'on a disposé d'amplificateurs suffisamment puissants. Jusque-là il avait fallu y renoncer, et l'appareil employé était le radiogoniomètre de Bellini-Tosi.

» Cet appareil se compose de deux grands cadres fixes rectangulaires C_1 , C_2 connectés à deux petites bobines rectangulaires c_1 , c_2 . Dans chacun de ces deux circuits, un condensateur variable γ_1 , γ_2 permet d'établir la résonance.

» Les bobines à angle droit c_1 , c_2 reproduisent, par la superposition de leurs champs magnétiques, un champ ayant exactement l'orientation du champ reçu par les cadres C_1 , C_2 .

» Une petite bobine de réception (non figurée) tournant dans l'intérieur des bobines c_1 , c_2 permettra de trouver la direction du champ et de faire la mesure de son orientation.

» Cet instrument est, en pratique, assez délicat à utiliser, et

M. Armagnat en fit une étude très serrée, qui lui permit de trouver les causes des diverses erreurs. Tout d'abord, il faut éviter, dans la construction, qu'aucune *capacité parasite* ne se produise, entre les divers fils et enroulements, car des capacités de ce genre créent des liaisons anormales entre les circuits, ce qui équivaut à des couplages indépendants du couplage qui existe normalement entre

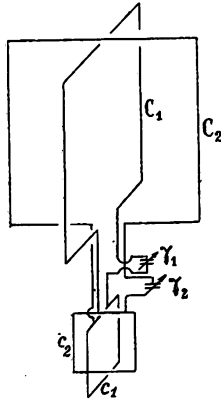


Fig. 2.

chacune des bobines c_1 , c_2 et la bobine exploratrice, d'où des déplacements du zéro observé.

» Mais surtout, ce qui est indispensable, c'est un *réglage très précis des capacités* γ_1 , γ_2 . Il faut, pour que la mesure puisse se faire avec exactitude, que les deux circuits C_1 , C_2 soient en résonance rigoureuse. Le moindre écart sur un des circuits, et ce circuit ne vibre plus exactement en phase avec la force électromotrice excitatrice. Les champs magnétiques des deux bobines c_1 , c_2 ne sont plus en phases, et la mesure devient inexacte ou même impossible. On ne trouve plus une direction où la réception s'annule. Il fallut, en conséquence, ajouter sur les appareils des petites capacités permettant de faire facilement le réglage très précis nécessaire, et les goniomètres ainsi modifiés donnèrent de très bons résultats.

» Mais M. Armagnat avait été frappé de l'extrême précision du réglage de cet appareil, et songeait dès lors à l'utiliser pratiquement pour les mesures et comparaisons de circuits oscillants étalonnés (ondemètres); je montrerai plus loin sous quelle forme très pratique et très générale il réalisa cette idée par sa *méthode de zéro* pour étalonnages de toutes sortes en haute fréquence.

» *Goniomètre à cadres. Mesures de résistances.* — Avec l'appari-

tion des amplificateurs à très grande puissance, il devint possible d'utiliser comme goniomètre un simple cadre mobile de petites dimensions; ce fut encore un des problèmes auxquels M. Armagnat s'attacha dès le début. Les premiers cadres réalisés (cadres de 1 m à 3 m de côté) montrèrent, dès qu'on les étudia, des résistances assez anormales en haute fréquence. Il fallut de très nombreuses mesures sur des cadres très variés pour mettre en évidence les causes de ces résistances exagérées, et y remédier.

» Plusieurs méthodes furent employées pour les mesures; j'utilisai au début la méthode de zéro, que j'exposerai plus loin, mais cette méthode était un peu longue et compliquée. M. Armagnat préféra le mode opératoire très simple, que voici :

» Un circuit producteur d'oscillations entretenues (arc, hétérodyne) agit par la bobine *a* sur la bobine *b* à étudier.

» Cette bobine *b* fait partie d'un circuit comprenant une capacité variable *c*, un ampèremètre sensible *r*; on peut introduire en circuit une résistance connue *A*. Cette résistance *A* est faite en fil très fin et très résistant, et garde la même valeur en haute fréquence qu'en courant continu. Il faut avoir soin d'opérer avec un couplage *M*, très lâche entre les bobines *a*, *b*, et avoir une source d'oscillations assez puissantes pour que l'énergie consommée dans le circuit *b* n'en soit

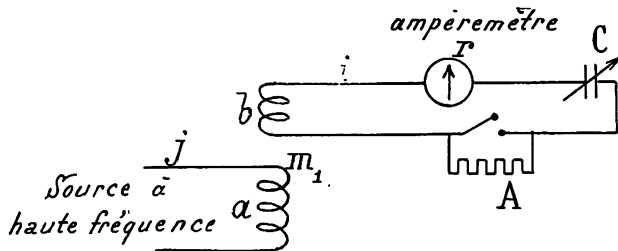


Fig. 3.

qu'une très faible partie. Dans ces conditions l'intensité *j* reste constante quel que soit le réglage du circuit *b*; on mesure les intensités du courant :

» 1° Sans mettre la résistance *A* en circuit,

$$i_0 = \frac{\omega M_1 j}{X + r};$$

» 2° Avec la résistance *A*,

$$i_A = \frac{\omega M_1 j}{X + A + r};$$

$\omega M, j$ = force électromotrice induite par le courant j de pulsation ω .

» D'où

$$X = A \frac{i_{\Lambda}}{i_0 - i_{\Lambda}} - r;$$

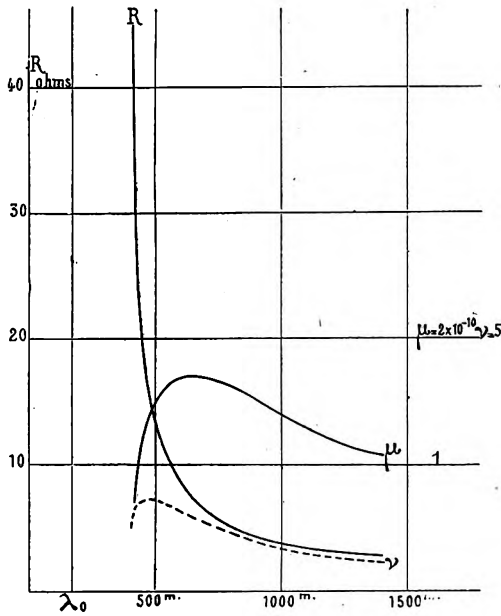
X résistance inconnue de la bobine b ; r résistance de l'ampèremètre et des fils de connexion.

» Les mesures faites en plaçant l'ampèremètre en divers points du circuit, et en particulier en l'intercalant dans la bobine b donnèrent des résultats très voisins, montrant ainsi que les inégalités de répartition du courant, toujours possibles en haute fréquence, ne jouaient qu'un rôle négligeable.

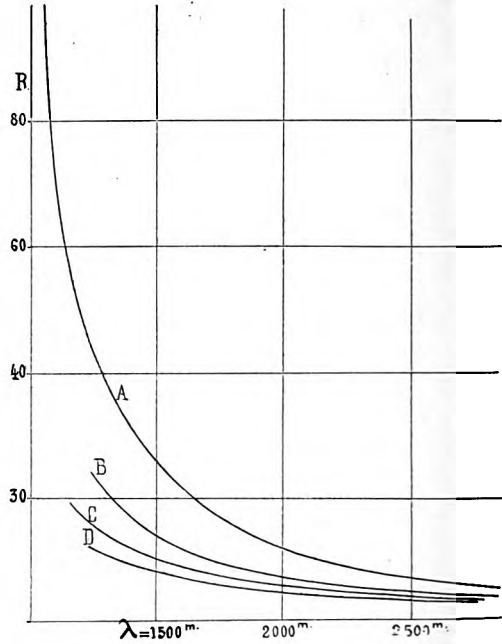
» MM. Abraham et Bloch firent, à la même époque, de nombreuses mesures par des procédés analogues, et aussi par une méthode extrêmement ingénieuse qui consistait à faire passer un courant de haute fréquence, d'intensité connue, dans la bobine, puis à mesurer ensuite l'échauffement de la bobine (par l'augmentation de résistance ohmique au courant continu). Les résultats concordèrent encore, indiquant bien cette fois que la perte d'énergie (l'échauffement) se produisait dans le cuivre du fil de bobinage, et qu'il ne fallait pas en général croire à des pertes d'énergie notables dans les isolants qui servent de support aux bobinages.

» Les résultats trouvés apparaissent alors comme assez curieux. La résistance d'une bobine ou d'un cadre croît d'abord lentement avec la fréquence, puis augmente rapidement et presque asymptotiquement jusqu'à des valeurs extrêmement élevées. Cette augmentation se produit dès que la longueur d'onde de mesure descend au dessous de deux ou trois fois la longueur d'onde propre de la bobine. Cet effet se retrouve sur toutes les bobines fermées, depuis les plus petites, jusqu'à de très grands cadres. Les mesures des planches I, II, III, IV, V, VI, empruntées à un travail de M. Armagnat, se rapportent à des cadres de toutes dimensions, jusqu'à un grand cadre antenne à 4 spires de 18 m de haut et 125 m de long.

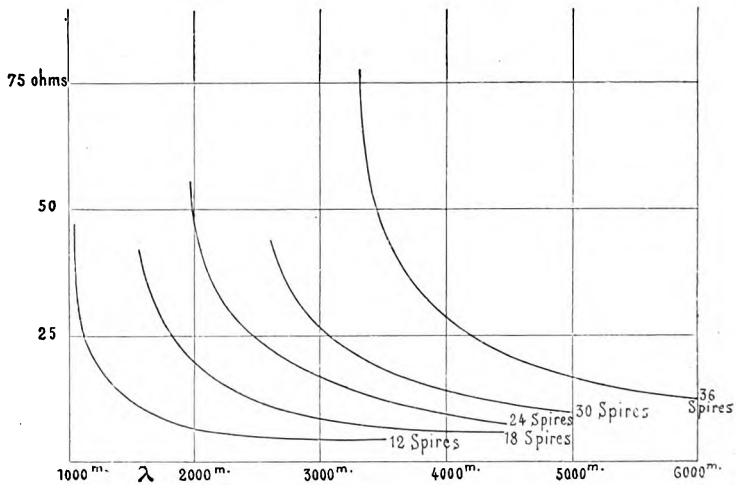
» La planche I met bien en évidence l'influence de l'écartement des spires. Avec le même nombre de spires, le même fil, les résistances diminuent bien plus rapidement que la self, lorsqu'on écarte les spires les unes des autres; la capacité entre spires joue donc un rôle particulièrement nuisible. Augmenter cette capacité, c'est augmenter la longueur d'onde propre, et par suite la résistance du cadre à une fréquence donnée.



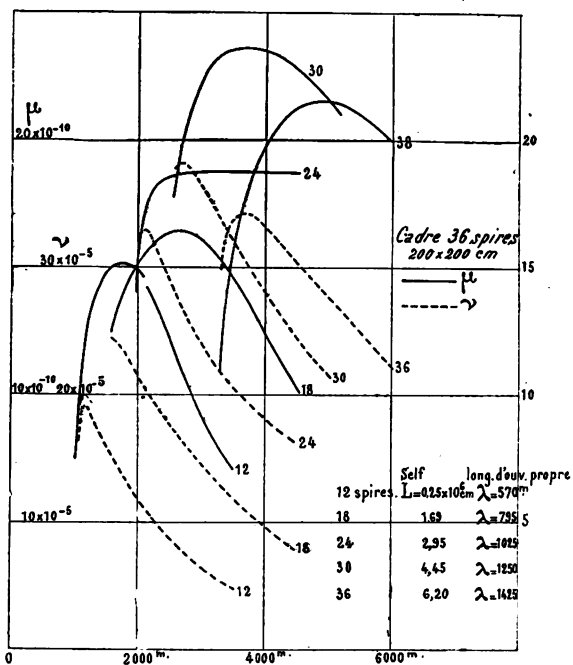
Spirale carrée, 5 spires, pas 12 mm.
Surface moyenne d'une spire 1,42 m².
 $L = 74000$ cm
 $\lambda_0 = 170$ m



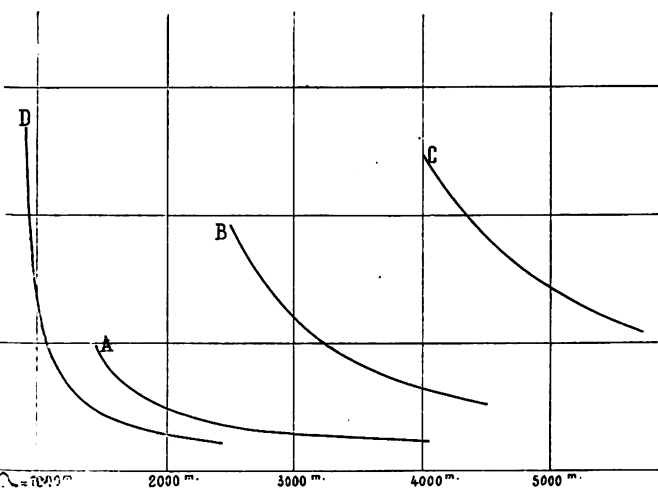
Cadre carré 150 × 150 cm, 12 spires.
A Pas de 2 mm $L = 880000$ cm
B Pas de 5 mm $L = 690000$ cm
C Pas de 10 mm $L = 500000$ cm
D Pas de 15 mm $L = 500000$ cm



Cadre de 36 spires, 200 × 200 cm de côté.

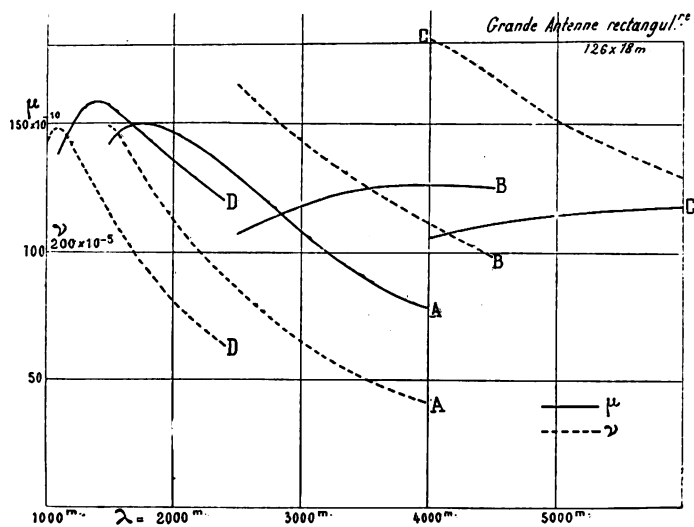


Pl. V.



Grande antenne rectangulaire 125 x 18 m, 4 spirales, pas 1 m.

Pl. VI.



» L'efficacité d'un cadre de réception peut se mettre en évidence. Soient h le champ magnétique extérieur, de pulsation ω ,

$$\omega = \frac{2\pi V}{\lambda};$$

S la surface totale du cadre. Le courant dans le cadre (supposé fermé sur une capacité C réglée à la résonance) est

$$i_r = \frac{\omega S h}{R},$$

et la tension aux bornes de la self,

$$u = i_r \omega L = \pi^2 V^2 h \frac{SL}{\lambda^2 R}.$$

C'est cette tension que l'on applique à l'amplificateur de réception.

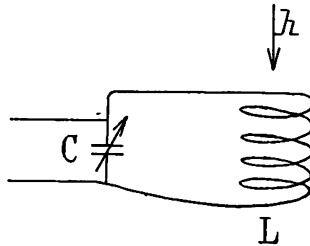


Fig. 4.

» On voit donc, qu'en ondes entretenues, l'efficacité d'un cadre se mesure par le coefficient

$$\mu = \frac{SL}{\lambda^2 R}.$$

Pour ondes amorties, Armagnat adopta le coefficient de comparaison

$$\nu = \frac{SL}{\lambda^2 \sqrt{R}}.$$

» Ces deux coefficients sont portés sur les courbes des planches ci-dessus; ils sont petits pour λ très grand, augmentent, passent par un maximum pour $\lambda = 3$ ou 4 fois λ_0 , puis diminuent très vite par suite de l'augmentation exagérée de R .

» A cause du terme S , il est certainement avantageux d'employer de grands cadres, en allant par exemple jusqu'à avoir une spire unique. De tels cadres montrent pourtant, eux aussi, une augmentation de résistance avec la fréquence. Le Tableau suivant,

tiré des planches III, IV (cadre à 36 spires) comparées aux planches V, VI (cadre de 125×18 m) montre l'ordre de grandeur :

	1 spire 125×18 m.	12 spires 2×2 m.
L.....	$0,62.10^6$	$0,86.10^6$
Maximum μ	150.10^{-10}	15.10^{-10}
Limite utile λ	1200 m	1500 m env.
Surface totale.....	2250 m ²	48 m ²

» Le petit cadre à 12 spires est donc 10 fois seulement moins avantageux que le grand cadre.

» Une fois réalisé un cadre convenable, pour la réception d'une certaine gamme de longueurs d'onde, d'autres difficultés surgissent pour l'emploi en radiogoniomètre.

» Il suffit en effet d'inégalités très faibles entre les capacités des divers points du cadre avec le sol pour fausser tous les résultats.

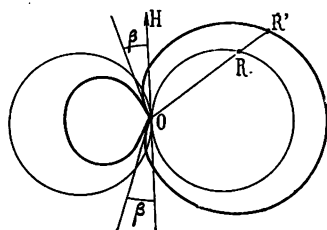


Fig. 5.

» Reprenons l'exemple de la figure 1, et supposons qu'un petit effet *antenne* se superpose à la réception normale par le cadre. Cet effet *antenne* aura pour effet une réception d'intensité constante, quelle que soit l'orientation. Le diagramme se déduira de celui de la figure 1 en ajoutant sur chaque rayon OR une grandeur RR' constante. On devra alors observer deux extinctions faisant des angles β et $\pi - \beta$ avec la direction H du champ magnétique. Les deux extinctions ne sont plus à 180° l'un de l'autre.

» Un tel effet *antenne* se produira si une des extrémités du cadre est au sol (ou reliée à des appareils ayant une grosse capacité par rapport au sol, tels qu'accumulateurs posés par terre), tandis que l'autre extrémité du cadre est libre.

» Ce défaut peut alors se compenser par un petit appareil qui permette d'égaliser les capacités des deux côtés du cadre par rapport au sol; c'est le compensateur indiqué par M. le professeur d'hydrographie Mesny, et dont le montage est suffisamment indiqué par la figure.

» Mais très souvent les capacités des différentes parties du cadre avec le sol sont variables avec l'orientation; dans ce cas, les mesures sont complètement viciées. Il faut donc construire un cadre

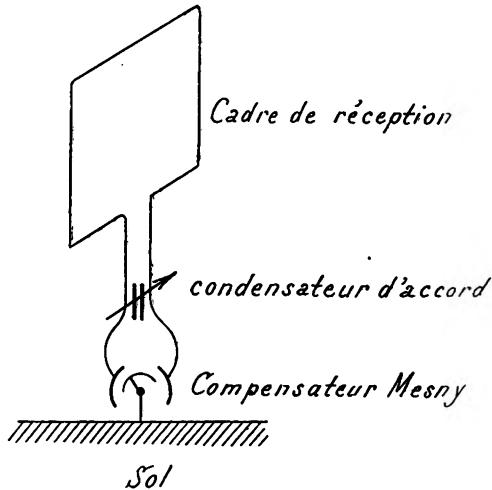


Fig. 6.

très symétrique, et une précaution souvent indispensable consiste à placer tous les appareils (accumulateur, amplificateur, circuit de réception) dans le cadre, fixés après lui et tournant en même temps. De tels cadres ont été réalisés dès 1916 à l'armée belge, et par M. Dufour. M. Armagnat en fit installer un très bien agencé pour les mesures, à la Radiotélégraphie militaire.

» Je n'insisterai pas sur les services multiples que peuvent rendre les radiogoniomètres. Mais, me plaçant au point de vue « mesures », j'indiquerai que le radiogoniomètre est un des instruments les plus instructifs pour l'étude expérimentale de la propagation des ondes de T.S.F. Les ondes de T.S.F. ne se propagent pas en ligne droite à la surface du sol. Elles contournent les obstacles (montagnes, nuages). On ne peut espérer obtenir avec précision la direction d'un poste-émetteur à plus d'une centaine de kilomètres de distance, dès que le terrain interposé n'est pas absolument plan et homogène. Et même, dans ce dernier cas, des nuages ou des orages peuvent parfaitement dévier les ondes de leur trajet. Ces déviations accidentelles peuvent atteindre 10 ou 20 degrés, parfois même plus. Je citerai un exemple. Les postes de T. S. F. espagnols observés par un goniomètre placé près de Briançon, étaient presque toujours repérés en Méditerranée; leurs ondes contour-

naient les Pyrénées, et passaient au-dessus de la mer pour atteindre la vallée du Rhône. Les observations des goniomètres ont fourni de nombreux exemples de ce genre.

» *Étalonnage des ondemètres.* — L'étalonnage d'ondemètres, ou la mesure de longueurs d'onde au moyen d'ondemètres, sont les

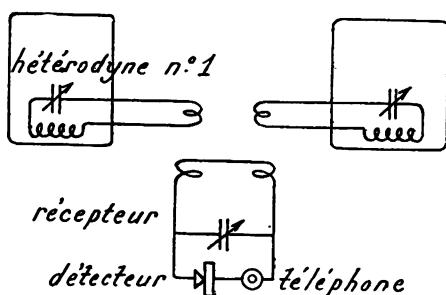


Fig. 7.

opérations les plus fréquentes et les plus nécessaires en T.S.F.

» Autrefois, la seule méthode utilisée était la méthode de résonance. Ayant à mesurer la longueur d'onde d'oscillations données, on les fait agir sur un circuit réglable étalonné au préalable, que l'on règle à la résonance. Si l'on observe la résonance au téléphone, la précision de la mesure ne dépasse pas 1 à 2 pour 100; avec un ampèremètre sensible, on peut régler la résonance avec une exactitude un peu supérieure.

» Je rappelle, d'une façon générale, que dans toutes ces mesures il est indispensable d'opérer avec des couplages extrêmement lâches.

» Mais la détermination d'un maximum, comme dans la méthode de résonance, est toujours assez difficile; aussi préfère-t-on beaucoup une méthode de zéro.

» Si l'on veut comparer deux sources de courant de haute fréquence, par exemple deux hétérodynes, la *méthode des battements* donne une précision extrêmement grande. Deux hétérodynes ont, l'une une fréquence n , l'autre une fréquence n' , et elles agissent toutes deux sur un circuit de réception avec détecteur et téléphone. Les deux oscillations, par leur superposition, produisent des battements ($n - n'$). Si les deux fréquences n , n' sont assez voisines, ces battements produisent au téléphone un son musical pur, de plus en plus grave, lorsque n' se rapproche de n . A l'accord exact, ce son disparaît.

» Cette méthode est extrêmement précise, et permet non seulement de régler la fréquence n' à la valeur n ; mais encore, par battements avec les harmoniques de la première hétérodyne, de régler n' à toutes les valeurs

$$n' = pn \quad (p \text{ entier}).$$

» Par battements entre harmoniques p de n et q de n' , on trouvera le réglage

$$pn = qn' \quad (p, q, \text{ entiers}).$$

» Ces exemples montrent la grande souplesse de la méthode.

» Pour le réglage d'un circuit oscillant non émetteur, tel que celui d'un ondemètre, la méthode de zéro de M. Armagnat est d'une extrême sensibilité et d'une grande variété d'applications.

» Frappé de la sensibilité de réglage des deux circuits du goniomètre Bellini Tosi, pour rendre possible l'extinction dans le circuit d'écoute, M. Armagnat chercha la manière d'utiliser cette sensibilité dans les mesures. C'est ainsi qu'après de nombreux essais il aboutit au schéma de la méthode de zéro. Un courant excitateur (courant d'un vibreur, par exemple) traverse les

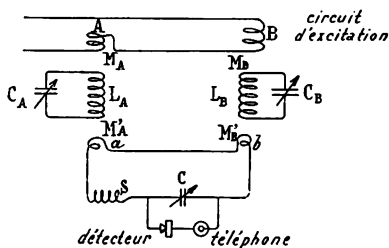


Fig. 8.

bobines A, B, qui agissent sur les circuits $L_A C_A$ et $L_B C_B$ qu'il s'agit de régler à la résonance. Ces deux circuits agissent par induction sur le circuit de réception $absc$ avec détecteur et téléphone.

» Lors d'une variation brusque du courant excitateur, les deux circuits $L_A C_A$, $L_B C_B$ sont excités par chocs et commencent à vibrer en même temps; moyennant un sens convenable des couplages, l'action des oscillations des deux circuits se compense sur le circuit d'écoute. On obtiendra un zéro net, lorsque les deux circuits étant exactement réglés d'accord, leurs actions se compenseront pendant toute la durée de leur vibration libre. Le réglage ainsi obtenu est très précis, presque à $\frac{1}{1000}$ près.

» La méthode devient encore plus sensible, si le circuit exciteur est parcouru par des oscillations entretenues; on disposera alors un tikker dans le circuit d'écoute.

» Soient :

$i = i_0 \sin \omega t$, le courant d'excitation;

$M_A M'_A$ l'induction mutuelle entre AL et La ;

$M_B M'_B$ l'induction mutuelle entre BL et Lb ;

R_A, R_B les résistances des circuits L_A, L_B .

» Les courants i_A, i_B dans les circuits L_A, L_B sont alors

$$i_A = \frac{\omega M_A i_0 \cos(\omega t - \varphi_A)}{R_A \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_A}}, \quad \tan \varphi_A = \frac{\omega^2 L_A C_A - 1}{\omega C_A R_A},$$

et une expression semblable pour i_B .

» Comme je suppose le réglage du zéro effectué, aucun courant ne traverse les bobines ab , qui n'exercent donc aucune action sur les circuits $L_A C_A, L_B C_B$. La condition du silence est que les forces électromotrices en a et b soient égales, ce qui donne

$$M_A \frac{di_A}{dt} = M_B \frac{di_B}{dt}.$$

» Cette égalité ne s'obtient que si l'on a

$$\frac{M_A M'_A}{R_A} = \frac{M_B M'_B}{R_B} \quad \text{et} \quad \varphi_A = \varphi_B.$$

» Si nous opérons auprès de la résonance $\omega^2 L_0 C_0 = 1$, nous poserons

$$L_A C_A = L_0 C_0 (1 + p_A), \quad L_B C_B = L_0 C_0 (1 + p_B),$$

$$\tan \varphi_A = \omega p_A \frac{L_A}{R_A}, \quad \tan \varphi_B = \omega p_B \frac{L_B}{R_B},$$

et la condition d'égalité des phases φ_A, φ_B s'écrit

$$p_A \frac{L_A}{R_A} = p_B \frac{L_B}{R_B}.$$

On réalise donc l'égalité des phases, ce qui ne correspond à l'égalité des fréquences propres des circuits L_A, L_B que :

» 1° Si les deux circuits sont à la résonance exacte sur la fréquence ω d'excitation;

» 2° Si les constantes d'amortissement $\frac{L}{R}$ des deux circuits sont égales.

» L'excitation en ondes entretenues donne d'ailleurs une sensibilité extrême; des dérèglages de $\frac{1}{10000}$ sur l'une des capacités C_A ou C_B sont très nettement perceptibles. La méthode sera donc très précieuse pour comparer des capacités et les étalonner; on opérera par substitutions de la capacité à mesurer à l'une des capacités C_A ou C_B , supposées connues, ou bien, si l'on a la courbe d'étalonnage de la capacité variable C_A , on ajoutera la capacité à mesurer aux bornes de C_A , dont on cherchera le nouveau réglage; la différence des deux mesures donnera la capacité inconnue.

» Les figures 9 et 10 donnent des schémas où l'opposition est

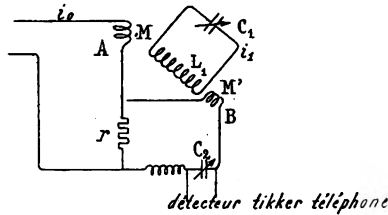


Fig. 9.

réalisée entre une force électromotrice induite et une différence de potentiel aux bornes d'une résistance. Ces deux schémas per-



Fig. 10.

mettent de régler le circuit LC à l'accord rigoureux sur la fréquence des oscillations entretenues du circuit d'excitation (arc ou hétérodyne).

» Soit $i = i_0 \sin \omega t$ le courant d'excitation.

» Le courant i_1 dans le circuit $L_1 C_1$ s'écrit

$$i_1 = \frac{\omega M i_0 \cos(\omega t - \varphi)}{R \sqrt{1 + \tan^2 \varphi}}, \quad \tan \varphi = \frac{\omega^2 L_1 C_1 - 1}{\omega C_1 R_1}.$$

Ce courant induit dans B une force électromotrice

$$e = M' \frac{di_1}{dt} = - \frac{\omega^2 MM' i_0 \sin(\omega t - \varphi)}{R \sqrt{1 + \tan^2 \varphi}};$$

cette force électromotrice ne pourra compenser la différence de potentiel

$$ri = ri_0 \sin(\omega t)$$

aux bornes de la résistance r , que si l'on a rigoureusement

$$\varphi = 0, \quad \text{c'est-à-dire} \quad \omega^2 L_1 C_1 = 1.$$

» Cette dernière méthode, constamment utilisée par Armagnat dans ses mesures de longueur d'onde de haute précision permet de régler le circuit LC d'accord avec une hétérodyne produisant les ondes, avec une précision dépassant nettement le millième, et pouvant atteindre $\frac{1}{10000}$.

» Les différentes méthodes exposées jusqu'ici sont des méthodes de comparaison. On règle deux circuits d'accord, sans savoir la valeur absolue de la longueur d'onde ou fréquence ainsi réalisée. Pour les mesures absolues, diverses méthodes ont été utilisées.

» 1^o *Emploi des capacités et selfs étalonnées.* — On choisira des formes de selfs et des types de capacités qui ne puissent pas varier avec la fréquence et on les comparera à des selfs et à des capacités des types calculables avec précision. Cette méthode ne donne que difficilement une précision de l'ordre de $\frac{1}{100}$.

» 2^o *Emploi d'un alternateur à haute fréquence.* — Cette méthode a été utilisée avec un petit alternateur de quelques watts de puissance et capable de donner jusqu'à 5000 m de longueur d'onde, alternateur très pratique réalisé par M. Boucherot. On connaît la fréquence par la mesure de la vitesse de rotation de l'alternateur. On réglait le circuit à étalonner à l'accord exact par la deuxième méthode de zéro indiquée plus haut.

» La méthode donne un peu plus du centième; il est encore assez difficile de faire tourner l'alternateur à une vitesse rigoureusement constante, et de mesurer exactement cette vitesse. Il semble pourtant qu'on pourrait, avec du soin, atteindre une précision de $\frac{1}{1000}$, mais on a préféré se servir de la troisième méthode.

» 3^o *Méthode du multivibrateur Abraham.* — Le multivibrateur réalisé par MM. Abraham et Bloch est un amplificateur à résistance à deux lampes, refermé sur lui-même. Son schéma est donné par la

figure 2. L'appareil ainsi bâti se maintient en régime d'oscillations entretenues, mais ces oscillations sont très particulières, et cor-

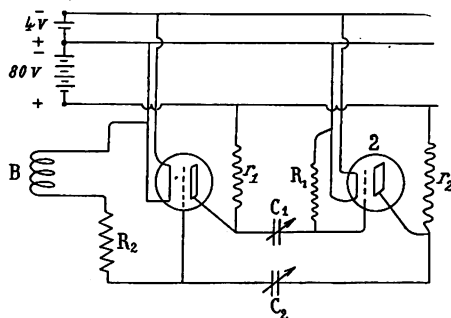


Fig. 11.

sistent en une suite de brusques à-coups de courants. Si on l'analyse, ce courant fournit, outre la fréquence fondamentale, une suite presque infinie d'harmoniques.

» On peut régler, par le jeu des capacités C_1 , C_2 , la fréquence fondamentale, sur une fréquence musicale connue, par exemple 1000 périodes. Il suffira de posséder un diapason à 1000 périodes, on écouterà à l'oreille les battements entre le son du diapason et le son d'un téléphone actionné par le courant du multivibrateur. L'accord du multivibrateur sur le diapason se réalise facilement à plus du millième près.

» On peut alors repérer les harmoniques qui se trouvent dans la gamme des longueurs d'onde de T. S. F., c'est-à-dire au-dessus du quinzième harmonique; leur longueur d'onde est connue en valeur absolue avec la même précision que la fréquence du fondamental.

» On peut d'ailleurs utiliser d'autres instruments que le multivibrateur. Tout courant périodique riche en harmoniques peut jouer le même rôle. Le courant d'entretien d'une lame vibrante ou d'un diapason, avec ses coupures brusques, présente aussi une suite indéfinie d'harmoniques et se prête très bien aux mesures.

» Les modes d'observation des harmoniques sont variés :

» 1^o *Résonance*. — On cherche, par le réglage du circuit oscillant, toutes les positions pour lesquelles le son du multivibrateur apparaît renforcé; ce sont les résonances sur les harmoniques.

» Cette méthode est peu précise. Les harmoniques étant très serrés et de puissances inégales, on observe des déplacements apparents des positions de résonance.

» 2^o M. Abraham, ayant noté cet inconvénient, proposa de trier un harmonique en le faisant battre avec une hétérodyne extérieure. Chaque harmonique donne un son de battement d'une hauteur différente; on peut, à l'oreille, les distinguer et observer la résonance sur l'un d'eux séparément. Mais il faut une oreille très exercée.

» 3^o M. Armagnat préféra une troisième méthode. On écoute les battements d'une hétérodyne avec le multivibrateur. Les notes de ces battements sont très nombreuses; mais lorsqu'on arrive à régler l'hétérodyne exactement sur la fréquence d'un des harmoniques, tous les sons de battements disparaissent et l'on n'entend plus que le fondamental du multivibrateur.

» L'hétérodyne qui est exactement d'accord avec le $n^{\text{ième}}$ harmonique donne des battements à 1000 par seconde avec le $(n + 1)^{\text{ième}}$ et le $(n - 1)^{\text{ième}}$ des battements à 2000 par seconde avec le $(n + 2)^{\text{ième}}$ et le $(n - 2)^{\text{ième}}$,

» Le réglage est d'une extrême sensibilité et précision.

» Il ne reste plus qu'à éteindre le multivibrateur et mettre l'ondemètre en résonance avec l'hétérodyne, ce qui peut se faire avec très grande précision par la deuxième méthode de zéro.

» Avec ce mode opératoire, chaque mesure isolée étant faite avec une précision supérieure au millième, on peut garantir le millième sur tout l'étalonnage de l'ondemètre.

» On peut aisément graduer, avec un multivibrateur à fondamental 1000, des ondemètres de 20 000 m à 5000 m de longueur d'onde. Pour des longueurs d'onde plus courtes, les harmoniques du multivibrateur deviennent trop rapprochés les uns des autres (il s'agit d'harmoniques au delà du soixantième).

» Il sera plus pratique de chercher les harmoniques d'une hétérodyne auxiliaire, réglée vers 6000 m de longueur d'onde par comparaison avec le multivibrateur, cette hétérodyne pouvant être du type multivibrateur.

» On peut ainsi remonter indéfiniment jusqu'aux plus courtes ondes sans erreurs notables, la méthode n^o 3 ci-dessus restant une des plus pratiques à l'emploi.

» La précision avec laquelle on arrive à graduer, par ces méthodes, un ondemètre étalon, en valeur absolue, est de l'ordre du millième. Les ondemètres de travail seront simplement gradués par comparaison avec l'ondemètre étalon, ce qui par la méthode de zéro peut se faire aussi au millième près.

» Les appareils actuels ne sont d'ailleurs pas constants à une

telle précision près. A l'usage, s'ils ne sont pas traités très soigneusement, ils arrivent facilement à varier de 5 à 10 pour 1000. En règle générale, il ne faudrait jamais se servir d'un ondemètre dont l'étalonnage n'a pas été récemment vérifié.

» Je crois avoir suffisamment indiqué les progrès des différentes méthodes de mesure de haute fréquence pour faire apprécier à leur juste valeur les recherches de M. Armagnat sur ces sujets. Et pour moi, je serai très heureux d'avoir apporté un juste hommage à la mémoire de l'ancien secrétaire de la Société des Électriciens, et contribué à faire connaître ses derniers travaux pendant la guerre. »

M. le PRÉSIDENT. — « M. Brillouin vient, avec une sobre élégance, de nous exposer les finesses et l'originalité de différentes méthodes de mesure employées en T.S.F. pendant la guerre.

» Il a nettement mis en lumière la part importante de notre ancien Secrétaire général Armagnat. C'est la meilleure manière de rendre hommage à la mémoire d'un collègue profondément estimable et nous l'en remercions sincèrement. »



RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Le contrôle des grosses quantités d'énergie, par E.-B. WEDMORE (*Inst. Elect. Eng.*, mai 1918).

Ce Mémoire, accompagné de sept Appendices et suivi d'une longue discussion, ne peut être ici résumé qu'à grands traits; l'original doit être consulté quant aux détails. Le problème, consistant à maintenir la continuité du courant de distribution, exige la répartition convenable de l'impédance dans les diverses parties du système, ainsi que des moyens propres à limiter les dérangements. A cet effet, il faut limiter l'énergie susceptible de se concentrer en un même point par suite d'un défaut, sans que cela entraîne une dépense excessive. L'auteur préconise, comme méthode de protection, l'usage en grand des réactances sous une certaine forme; celles-ci peuvent être employées soit sur les feeders, soit sur les génératrices, ou encore entre les barres omnibus. Des chapitres sont consacrés à chacune de ces méthodes. Il y a une limite à l'emploi de la réactance de génératrice, car si cette réactance réduit le courant de court circuit, elle ne maintient par la continuité du courant de distribution. Il y a donc lieu de recourir à des réactances sur les feeders ainsi qu'entre les barres omnibus (d'après la méthode de l'« étoile » ou celle de l'« anneau »). L'importance de ces points est examinée amplement dans le Mémoire, et peut-être plus en détail dans quelques-uns des Appendices. Les réactions inhérentes doivent être utilisées autant que possible, et l'on ne recourra à une réactance artificielle supplémentaire que pour assurer une localisation satisfaisante des dérangements et pour protéger suffisamment l'installation contre des efforts excessifs. Les Appendices procurent d'amples renseignements sur la disposition à donner aux barres omnibus, sur la limitation du courant par l'emploi de la réactance entre barres omnibus, et sur le transfert des charges. Un autre Supplément traite de l'échauffement et des efforts dus aux courants de grande intensité. Enfin, de la discussion soulevée par le Mémoire, est résulté un sérieux apport d'expérience générale.

Système de distribution électrique souterraine, par G.-J. NEWTON (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mars 1918).

On peut suivre ici, pas à pas, le calcul d'un système de distribution électrique souterraine appliquée à une ville d'importance moyenne, étant pris pour exemple un système comprenant : une distribution d'éclairage en monophasé 110-220 volts, une distribution de force motrice en triphasé 220 volts et un éclairage de rues en série, arc et incandescence. Une suite de cartes de la ville représentent : 1° la distribution de la charge; 2° l'éclairage des rues; 3° les centres de distribution; 4° les feeders de force motrice primaires, 220 volts; 5° la canalisation de force motrice triphasée, 220 volts; 6° les feeders de force motrice secondaires, 2200 volts; 7° les feeders d'éclairage, 2200 volts; 8° la canalisation secondaire,

220 volts; 9° la canalisation du neutre en câble nu; 10° les feeders d'éclairage secondaires; enfin, 11° le système de tubage isolant. Le calcul de ces divers éléments est discuté en détail, et les dispositifs de tubes, les voûtes ou caveaux de transformateurs, ainsi que les trous d'homme, sont successivement traités.

Le parafoudre à oxyde et à pellicule, par C. FIELD (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juin 1918).

Ce parafoudre comprend une pellicule isolante en contact avec une poudre conductrice. Les surtensions percent la pellicule isolante, mais la poudre se transforme elle-même en isolant sous l'action de la chaleur due au passage momentané du courant. Il y a là un effet d'isolement par auto-obturation, qui permet le passage de la décharge en éclair, mais s'oppose à la décharge consécutive de l'énergie. Le peroxyde de plomb est une poudre particulièrement appropriée à ce type de parafoudre. La résistivité de Pb O_2 est d'environ 0,35 ohm par centimètre cube; vers 150° C, le Pb O_2 se réduit en $\text{Pb}^3 \text{O}^4$ dont la résistivité est d'environ $9,5 \times 10^6$ ohms par centimètre-cube; enfin, à une température un peu plus élevée la réduction se continue en Pb O qui, pratiquement, est un isolant. Les oxydes de bismuth donnent des résultats analogues.

Sous sa forme commerciale, le parafoudre à pellicule d'oxyde comprend deux électrodes constituées par des feuilles ou plaques métalliques recouvertes d'une mince pellicule solante. Les plaques sont écartées de 1,3 cm et l'intervalle est rempli de peroxyde de plomb. Pour une tension de 300 volts, ou à peu près, par élément, la perte de courant n'est que de quelques milliampères. Quand la tension-limite est atteinte, la pellicule se perce (plus soudainement que la pellicule hydroxyde du parafoudre à aluminium), et la décharge en éclair s'écoule à la terre, sans rencontrer pratiquement de résistance dans le parafoudre. Le courant dynamique commence à suivre cette décharge, mais la densité de courant, à travers les perforations de la pellicule, est tellement élevée, que la poudre conductrice immédiatement adjacente est convertie presque instantanément en une sorte de tampon isolant. Cet effet se produit en moins de $\frac{1}{1000}$ de seconde après la fin de la décharge en éclair. Diverses méthodes, pour la préparation de la pellicule isolante appliquée sur les électrodes, sont décrites; il semble que la meilleure méthode soit de tremper des plaques de laiton, d'acier ou de cuivre, bien polies, dans du vernis ou de la laque.

L'action du parafoudre est plus qu'assez rapide pour parer à une tension électrique anormale avant que l'isolement ait à souffrir. En série avec les éléments est un éclateur à sphères, d'action aussi rapide que le comporte tout bon éclateur. La résistance en série du peroxyde, dans le trajet du courant, ne donne pas lieu à une chute de tension excessive, et l'inductance du parafoudre constitue un minimum. Un des principaux inconvénients de ce type de parafoudre est que sa résistance augmente après un certain nombre de décharges, inconvénient dû sans doute à ce que l'air intersémitiel, étant chauffé par les décharges, produit une poussière fine et par suite un mauvais contact entre les particules d'oxyde. Un choc violent, ou bien un effet de compression, ramènent la résistance à peu près à sa valeur normale. Pour tous les parafoudres à oxyde et pellicule employés sur courant alternatif, le facteur de puissance est voisin de l'unité. Le diamètre des piqures, dans la pellicule isolante, est d'environ 0,005 cm, et la conductibilité calorifique de la poudre est si faible qu'il y a seulement réduction d'un peu plus de poudre qu'il n'est nécessaire pour

obturer les piqûres. Les caractéristiques générales du parafoudre à oxyde et pellicule sont tout à fait semblables à celles du parafoudre électrolytique à aluminium, mais le premier ne comporte pas d'électrolyte et n'exige que très peu de soins. Des notes relatives à l'essai du parafoudre à oxyde et pellicule, ainsi que des oscillogrammes montrant l'efficacité de celui-ci, terminent le Mémoire.

Réactance des machines synchrones, par R.-E. DOHERTY et O.-E. SHIRLEY
(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juillet 1918).

Les auteurs indiquent les équations propres à déterminer la réactance inductive de l'induit des machines synchrones. Des chiffres calculés, ainsi que des chiffres d'expériences, sont donnés sous forme de tableaux, pour 138 machines. Par suite de l'induction mutuelle entre phases, la réactance effective d'un enroulement triphasé est de 50 pour 100 plus élevée que la réactance d'un enroulement monophasé. Dans les machines monophasées la réactance varie pendant le cycle, mais dans les machines triphasées reliées en étoile, cette pulsation de la réactance disparaît. En cas de courts circuits subits, le courant est limité, non seulement par la réaction d'induit, mais encore par la self-induction combinée du champ et des circuits d'induit, autrement dit, la « réactance transitoire ». Afin de découvrir les causes physiques de cet effet, les flux de dispersion du champ, pour un certain nombre de formes de pôles différentes, furent mesurés expérimentalement à l'aide de limailles de fer. Les courants transitoires de court circuit, calculés d'après les méthodes proposées par les auteurs, sont comparés avec des oscillogrammes, et ce, pour 11 machines différentes. L'inclusion de la self-induction de champ réduit d'environ 50 pour 100 le courant de court circuit calculé. Il est montré que, en court circuit, il y a une augmentation appréciable du flux en bas du pôle, laquelle s'élève à 30 ou 40 pour 100 du flux normal; cela explique la variation du facteur d'affaiblissement du champ, quelques cycles après le moment du court circuit. Des Appendices ont trait à l'effet des harmoniques sur l'onde de flux, en marche à vide, et au calcul de la réaction d'induit des machines à pôles saillants, en tenant compte de la variation de la réactance. A signaler enfin un index bibliographique de toute utilité.

L'énergie électrique pour la fixation de l'azote, par E.-K. SCOTT
(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juillet 1918).

L'auteur compare le procédé direct de fabrication de l'acide nitrique par l'arc électrique, avec le procédé indirect de la cyanamide. Il démontre que le procédé de l'arc est de beaucoup le plus simple, et il suggère d'établir un certain nombre d'installations dans des centrales électriques, et de les utiliser en dehors des heures de pointe. Une installation de 10 000 kilowatts, par exemple, répondrait bien au but proposé. En créant de tels établissements à proximité des régions requérant des nitrates, on réaliserait évidemment une très grande économie de transport. Un schéma montre un projet d'ensemble d'une installation de fours à coke, productrice d'ammoniaque, etc., avec centrale électrique utilisant l'excédent de gaz et alimentant des fours à arc. La quantité d'acide nitrique, fabriquée dans

un établissement de ce type, serait à peu près celle exigée pour sa combinaison avec l'ammoniaque et l'obtention de nitrate d'ammonium.

Génératrices à courant continu, à potentiel constant pour une vitesse variable,

par S.-R. BERGMAN (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, août 1918).

La machine décrite comporte un induit à enroulement série et un inducteur dont le nombre de pôles est double de celui pour lequel l'induit est enroulé. Le dessin montre un induit à deux pôles et un inducteur à quatre pôles, les pôles inducteurs produisant deux flux à 90° l'un de l'autre.

Le collecteur comporte trois balais, dont deux situés sur un diamètre occupant le milieu des deux flux, et dont le troisième est situé entre les deux premiers, à égale distance de ceux-ci. Les enroulements de champ sont en parallèle sur le balai du milieu et sur l'un des balais extrêmes, l'un des circuits étant saturé et l'autre non. Le premier engendre le « voltage principal » de la machine, entre le balai du milieu et l'un des balais extrêmes, et le dernier engendre le « voltage transversal », entre le balai du milieu et l'autre balai extrême. L'excitation est prise aux balais donnant le voltage principal. Les deux flux sont tout à fait indépendants et la variation de chacun d'eux n'affecte que le voltage qui lui est propre. La charge extérieure est prise aux balais extrêmes et le voltage sur ceux-ci est fonction de la différence entre les voltages principal et transversal. L'effet des champs susmentionnés, combiné avec la réaction d'induit, détermine, aux balais extrêmes, un voltage qui est indépendant de la vitesse de la machine. Comme la génératrice en question implique l'emploi différentiel de deux champs, elle est de dimensions plus grandes qu'une machine « standard » de même débit, mais moyennant un sacrifice d'environ 10 pour 100 sur le rendement, elle peut se construire sous le même poids qu'une machine standard.

Effets inductifs des chemins de fer à courant alternatif sur les circuits de communication, par H.-S. WARREN (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, août 1918).

Une importante cause de troubles inductifs sur les lignes télégraphiques et téléphoniques est celle due à l'électrification des chemins de fer par courant alternatif.

La fréquence des courants téléphoniques varie entre 200 et 4000 périodes ou plus, par seconde. Quant aux impulsions de signaux sur les lignes télégraphiques, qui sont également complexes, elles n'atteignent pas (du moins les plus importantes), l'ordre de 300 périodes par seconde.

Les circuits d'énergie sont ordinairement à 25 ou 60 périodes par seconde, mais à la périodicité fondamentale s'ajoutent les harmoniques, et c'est surtout à la présence des harmoniques qu'est dû le bruit produit par induction dans les circuits téléphoniques. En ayant soin de calculer les machines destinées à l'énergie, de manière à réduire la proportion de ces harmoniques, on peut éviter en grande partie la cause de trouble susmentionnée. S'il y a rupture d'un des conducteurs d'énergie, ou mise à la terre de celui-ci, il se produit, dans les circuits de communication voisins, des perturbations susceptibles de mettre en jeu des quantités d'énergie relativement élevées.

Les tensions et les intensités des circuits d'énergie peuvent se classer en deux catégories : 1° tensions et intensités équilibrées, c'est-à-dire symétriques par rapport à la terre, et 2°,

tensions et intensités résiduelles, c'est-à-dire complètement déséquilibrées par rapport à la terre. A chaque instant, la somme algébrique des intensités et des tensions équilibrées est nulle. Il en résulte que, à chaque instant, la somme algébrique des intensités, dans les conducteurs de ligne, est l'intensité résiduelle, et que, pareillement, la somme algébrique des tensions à la terre de ces conducteurs, est la tension résiduelle. Par exemple, dans le circuit ordinaire de chemin de fer, avec fil de trolley aérien et rail de retour à la terre, la totalité de la tension et la totalité de l'intensité sont résiduelles.

L'auteur examine les modifications à apporter dans le calcul et l'arrangement du matériel d'énergie, pour réduire ou éliminer les effets résiduels, notamment ceux dus au troisième harmonique rencontré dans les groupes de transformateurs reliés en étoile, ainsi qu'au manque d'équilibre dans le circuit d'énergie lui-même. La transposition du circuit d'énergie est discutée. Pour rendre cette transposition efficace, il est nécessaire que les intervalles choisis soient courts par rapport aux longueurs d'ondes des harmoniques. L'auteur examine ensuite : les circuits de communication non équilibrés ; les transpositions ; la longueur des parallèles ; la configuration de la ligne d'énergie ; les formes d'ondes ; les appareils situés aux extrémités des circuits de communication ; les tensions et les intensités des circuits d'énergie sous des conditions anormales ; le coût relatif des précautions contre l'interférence.

Enfin il discute les modes de précaution applicables au circuit d'énergie, et aussi certains modes de précaution applicables au circuit de communication, savoir : transformateurs de neutralisation ; sectionnement du circuit téléphonique ; fil protecteur ; circuits en résonance ; trolley double ; sectionnement du système de trolley ; et il termine par une description de quatre installations importantes de chemins de fer, en indiquant, et les moyens adoptés dans chaque cas pour empêcher l'interférence, et le degré de succès obtenu.

Le développement de la soudure électrique aux États-Unis, par H.-A. HORNOR
(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, octobre 1918).

L'auteur passe en revue les applications, aux États-Unis, de la soudure électrique par points (*spot welding*) et de la soudure par l'arc. Il montre l'activité déployée par le « Welding Committee of the Emergency Fleet Corporation » en vue de l'application des procédés de soudure électrique à l'industrie des constructions navales, et il indique la voie à suivre pour l'application générale de ces méthodes aux autres industries. Comme exemple d'économie réalisée par la soudure électrique, le Mémoire signale que, pour certain chantier de construction, le nombre total des parties à souder, dans un navire type, s'élève à 225 000. Le coût de la main-d'œuvre, pour le rivetage de ces parties, serait d'environ 245 000 dollars, et serait, pour la soudure, de 99 000 dollars, soit une économie de 146 000 dollars. En certains cas, l'économie atteint 90 pour 100.

Constantes électriques pour le calcul des lignes aériennes, par R. Norsa
(*Elettrotecnica*, 25 novembre 1918).

Les constantes électriques nécessaires au calcul des conducteurs aériens ne figurant dans aucun manuel, l'auteur a voulu combler cette lacune et il propose des tables et des

diagrammes donnant la résistance, l'effet Kelvin, la réactance, l'impédance, etc., pour des fils ronds ainsi que pour des conducteurs câblés et toronnés. Ces tables se rapportent aux sections comprises entre 6 mm² et 240 mm² et à des distances entre conducteurs qui varient de 25 cm à 300 cm. On a choisi les fréquences de 42 et 50 périodes comme étant celles les plus couramment employées industriellement.

L'unification des tensions en Italie, par E. SOLERI (*Elettrotecnica*, 5 décembre 1918).

Le grand nombre de tensions différentes usitées dans les stations d'énergie électrique de l'Italie offre beaucoup d'inconvénient, car cela met les installations dans l'impossibilité de s'entre'aider.

Comme naguère pour l'unification des fréquences, l'Association Électrotechnique italienne a désigné un sous-comité en vue d'étudier de quelle manière l'unification des tensions peut être réalisée. Dans le présent article, l'auteur se réfère aux données fondamentales du problème.

Les diverses tensions inférieures à 600 volts, adoptées dans les installations électriques italiennes, sont au nombre de 240. Tous les systèmes figurent dans ce nombre : courant continu, monophasé, triphasé. La puissance totale distribuée s'élève à 813 711 kw. Un tableau et un diagramme montrent l'importance relative des divers systèmes.

L'auteur n'est partisan de l'intervention de l'État que pour fixer les basses tensions, la décision relative au choix des hautes tensions devant être laissée aux Compagnies elles-mêmes.

Ligne de transport d'énergie à 110 000 volts au-dessus de la rivière du Saint-Laurent,
par S. SVENNINGTON (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, novembre 1918).

Cette rivière est traversée par des lignes de transport d'énergie dont la portée centrale atteint 1460 m : la plus longue qui existe dans le monde. Les tourelles supportant les câbles ont une hauteur de 106 m. Il existe également une portée de 174 m sur la rive nord et une autre de 290 m sur la rive sud. Trois lignes de câbles, écartées de 15 m, franchissent le fleuve.

Les câbles, en acier galvanisé, ont un diamètre de 35 mm ; ils sont formés de 6 torons de chacun 19 fils, et d'une âme de 30 fils d'acier câblés.

Résistivité et coefficient de température de l'aluminium, par G. GRASSI
(*Elettrotecnica*, 5 janvier 1919).

La détermination de la résistivité de l'aluminium est encore à poursuivre, puisque les valeurs adoptées en divers pays ne concordent pas. L'auteur a déjà publié (en 1917) les résultats d'une série d'expériences et le présent article est une suite à cette publication. Les méthodes adoptées pour les mesures, le degré d'exactitude probable, ainsi que les corrections de différente nature, sont indiqués avec soin. Quatre lots de fils, dont la cons-

titution chimique avait été déterminée au préalable, furent expérimentés entre 0° C. et 100° C. Leur résistivité varia, selon leur origine, entre 0,02620 et 0,03037, tandis que leur coefficient de température, a_0 , fut lui-même compris entre 0,004353 et 0,003760. Les premiers chiffres, de part et d'autre, se rapportent au métal le plus pur, et les seconds au métal le moins pur.

Comme lors de ses précédentes mesures, l'auteur reconnut, au cours de celles-ci, que le produit $R \times a$ est constant, R représentant la résistivité à t degrés, et a le coefficient de température à ce même nombre de degrés. En particulier, $a = \frac{a_0}{1 + a_0 t}$. La valeur

moyenne du produit $R \times a$ fut de 0,0001 141, l'écart maximum n'atteignant pas 1 pour 100. Pour les fils recuits, la valeur moyenne du produit $R \times a$ fut de 0,0001 152.

Profitant de cette particularité que la valeur $R \times a$ est une constante, l'auteur procède à la mesure de la résistivité de l'aluminium en mesurant le coefficient de température. Cette méthode évite les délicates mesures de longueur et de diamètre du fil.

Vers l'unification des tensions et des fréquences, par G. REBORA
(*Elettrotecnica*, 25 décembre 1918).

C'est là un problème d'actualité en Italie. L'auteur, après avoir passé en revue les solutions exprimées en Italie même, et dans les autres pays, énonce quelques propositions concrètes pour ce qui regarde les installations italiennes. Il propose, comme type de courant, le triphasé, et la fréquence 50. Quant aux tensions, l'auteur suggère 125 et 150 volts pour la lumière; 220, 260, 440 et 500 volts pour la force motrice; 3000 et 6000 pour les systèmes de distribution locale; 3000, 6000 et 10 000 pour les alternateurs; 10 000, 15 000, et 30 000 pour les systèmes de distribution de grande étendue; enfin, 15 000, 30 000, 50 000, 65 000, 80 000 et 100 000 volts pour le transport de l'énergie. Quelques diagrammes montrent l'importance relative des tensions actuellement usitées, et conjointement, le nombre d'habitants qui les emploient.

Application de l'analyse harmonique à la théorie des machines à courant alternatif synchrones, par W.-V. LYON (*Amer. Inst. Elec. Eng.*, septembre 1918).

Les méthodes d'analyse harmonique sont ici appliquées pour exprimer les effets de la distribution des encoches, de la saturation magnétique et de la réaction d'induit, sur la distribution du flux dans l'entrefer et sur les formes d'ondes de force électromotrice et d'intensité dans les machines synchrones. L'auteur donne des formules permettant de calculer la densité de flux en un point quelconque de l'entrefer, dans le cas d'enroulements de champ distribués en divers nombres d'encoches par pôle, et occupant diverses proportions de l'arc polaire; il montre comment deux harmoniques quelconques, et leurs multiples impairs, peuvent être éliminés de la distribution du flux par une disposition convenable des encoches. L'effet, sur la tension de l'induit, de la distribution de l'enroulement d'induit, celui des pulsations du courant d'excitation et celui des encoches d'induit, sont discutés ensuite; puis, l'auteur passe aux effets de la réaction d'induit et du courant de court circuit. Enfin, le Mémoire se termine par l'exposé d'une méthode permettant de

calculer le courant d'excitation nécessaire pour des charges à divers facteurs de puissance; et afin de justifier l'emploi de la méthode il est donné un Tableau d'où sont extraits les chiffres suivants :

Données d'un moteur triphasé synchrone :

1080 HP.; 6600 volts; 6 pôles.

Débit.	Volts.	Facteur de puissance.	Courant d'excitation, en ampères, calculé d'après		
			règlement de l'A. I. E. E.	l'auteur.	Observé.
500 Kv-A.....	240	—0	»	134	135,5
1500 »	2300	—0	»	135,7	130
2000 »	2300	—0	»	214	227
2500 »	2300	+0	67	—6	—4,8
5000 »	2300	—0	»	258	251
5000 »	6600	1,0	165	170	169
110 A.....	6600	+0,72	16,7	13	12
95,5 A.....	6600	+0,42	16,1	3,47	2

N. B. — Dans la colonne des facteurs de puissance : le signe — indique une intensité en retard sur la force électromotrice; le signe + indique une intensité en avance sur la force électromotrice.

Revue critique de la bibliographie relative à l'attraction magnétique non équilibrée dans les dynamos, par A. GRAY et J.-G. PERTSCH (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, septembre 1918).

Diverses équations tirées de la formule de Maxwell relative à l'attraction d'un électro-aimant ont été fournies, durant les 16 dernières années, pour calculer la pression exercée sur les paliers d'un arbre de dynamo, par suite des forces magnétiques non équilibrées produites sur un induit excentrique. L'auteur cite les formules de Fischer-Hinnen, Behrend, Knowlton, Rey, Sumec et Niethammer, et il se réfère aux méthodes de Rosenberg, Moore, Miles, Walker, etc.

L'amélioration du facteur de puissance considéré comme une conséquence de l'unification des fréquences, par A. CUSMANO (*Elettrotecnica*, 5 février 1919).

Le problème de l'unification des fréquences dans les installations électriques italiennes fut étudié, comme on sait, par un Comité de l'Association Électrotechnique italienne, laquelle proposa d'adopter, pour les nouvelles installations, les fréquences existant déjà dans la région. L'auteur considère que cette proposition n'est pas toujours rationnelle, car elle ne procurerait point, dans certains cas, la plus grande somme d'avantages. Pour

appuyer sa thèse, l'auteur calcule le prix de revient d'une nouvelle installation dans un cas concret, en adaptant d'abord la fréquence 42 de la région, et ensuite la fréquence 50 avec installation d'un changeur de fréquence synchrone pour le transport de l'énergie entre la nouvelle installation et l'ancienne. L'augmentation du facteur de puissance, obtenue par le choix d'un changeur de fréquence de dimension convenable, permet de réaliser une économie dans les prix des alternateurs, des transformateurs et de la ligne, de sorte que, finalement, l'installation devient moins onéreuse que si la fréquence 42 était adoptée. De plus, comme le coût des appareils pour la fréquence 50 est moindre que pour la fréquence 42, une économie supplémentaire pourrait être réalisée dans les prix des transformateurs et moteurs individuels.

En conséquence, l'auteur préconise l'adoption de la fréquence 50 pour les installations nouvelles, solution qui, en cas de connexion avec une ligne à fréquence 42, concilierait l'intérêt particulier, qui est de sauvegarder l'économie, avec l'intérêt général, qui est d'accroître le facteur de puissance.

Appareils pour l'essai des aimants de magnétos, par G. MARTINEZ
(*Elettrotecnica*, 25 janvier 1919).

Cet appareil, du type génératrice, comprend un induit et des pièces polaires, et l'électro de champ est constitué par l'aimant permanent à essayer, celui-ci étant mis en position convenable pour l'essai. Un voltmètre relié aux bornes de la génératrice donne des lectures proportionnelles au flux, pour une vitesse donnée qui est lue au tachymètre. Le flux peut alors être déterminé : un trait rouge, tracé sur le côté du voltmètre, indique la valeur de flux que les aimants doivent pour le moins atteindre. La force coercitive est déterminée au moyen de deux bobinages placés sur les pièces polaires. On fait passer dans ces bobinages un courant dont le sens est en opposition avec le flux des aimants et l'on note le courant nécessaire pour réduire à zéro la lecture du voltmètre.

Rigidité diélectrique des pellicules d'air incluses dans un isolant solide ; application au calcul des bobines et câbles d'alternateurs, par F. DUBSKY (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, février 1919).

Il est important, au point de vue théorique comme au point de vue pratique, de pouvoir prédéterminer la rigidité diélectrique des pellicules ou bulles d'air emprisonnées dans un isolant solide. Si de telles pellicules sont soumises à un effort électrique excessif, l'isolant solide risque d'être endommagé par action chimique, par échauffement local, par action mécanique, etc., dus à la corona. On procéda donc à une recherche expérimentale sur la rigidité de pellicules d'air de diverses épaisseurs incluses entre des plaques de verre. Dans le dispositif employé, la rupture diélectrique de l'air, ou le point de formation de la corona, pouvait être facilement observé. Des expériences analogues furent effectuées sur des pellicules d'air incluses parmi d'autres isolants solides. On reconnut que la rigidité diélectrique des pellicules d'air, entre isolants, était pratiquement la même que celle des pellicules d'air entre conducteurs.

La seconde partie du Mémoire est consacrée à l'application pratique des données ci-dessus au calcul des bobines et des câbles d'induit, avec accompagnement de plusieurs exemples spécifiques.

Alimentation d'énergie monophasée par des systèmes triphasés, par M. WALKER
(*Inst. Elect. Eng.*, janvier 1919).

Les méthodes d'alimentation d'énergie monophasée sont exposées sous les rubriques suivantes : 1° génératrices monophasées actionnées par des moteurs primaires, indépendamment des génératrices triphasées ; 2° génératrices triphasées construites pour fournir de l'énergie monophasée : la charge totale se divise ainsi en deux fractions, réparties sur l'une et sur l'autre des phases d'une génératrice diphasée ; 3° possibilité d'employer des groupes moteurs-générateurs ; 4° possibilité d'emprunter le courant monophasé à l'une des phases d'une distribution triphasée, en employant, pour équilibrer les phases, un égalisateur ou compensateur, soit du type fixe, soit du type mobile. Il est démontré que l'élimination de la composante alternative de l'énergie n'amène pas nécessairement un équilibre des phases. La vraie méthode d'équilibrage des phases, par exemple dans le cas d'un four électrique travaillant avec un facteur de puissance de 0,7, est exposée, tant pour un égalisateur à bobine de réactance que pour un égalisateur à condensateur. Les égalisateurs du type mobile comprennent : ou *a.* un enroulement d'équilibrage à nombres de tous dissymétriques ; ou *b.* un transformateur survolteur en série avec l'enroulement ; ou *c.* l'addition, pour certaines phases, de bobines de réactance ou de condensateurs ; ou *d.* un générateur survolteur en série avec l'enroulement ; ou *e.* la production d'un champ magnétique de fréquence double, tournant en sens contraire. La description de ces divers types est illustrée de diagrammes. 5° On peut employer un transformateur compensateur rotatif qui absorbe, dans un enroulement, l'énergie triphasée équilibrée, et fournit une charge monophasée par un enroulement indépendant. Cette méthode est particulièrement intéressante en ce qui touche les fours électriques monophasés. L'auteur présente des calculs relatifs à un type de transformateur compensateur pour alimenter un four électrique de 400 kw ; il y joint des chiffres se rapportant à des essais à vide et à pleine charge. Suivent des Appendices relatifs à : 1° charge monophasée prise sur génératrice triphasée ; 2° élimination de la composante d'énergie monophasée sans obtention d'un équilibre des phases ; 3° établissement d'un graphique montrant l'équilibre de l'énergie et des phases obtenu au moyen d'une bobine de réactance ; 4° compensateur à bobine de réactance procurant l'équilibre de l'énergie mais non l'équilibre des phases ; 5° méthode pour choisir les voltages composants des trois phases, de manière à obtenir des courants équilibrés, dans le cas d'un égalisateur à bobine de réactance et dans celui d'un égalisateur à condensateur ; 6° calcul des dimensions ; 7° méthode pour calculer le nombre des tours de compensation ; 8° calcul des ampères-tours à donner à l'électro de champ ; 9° calcul des pertes dans le cuivre. Au cours de la *discussion*, quantité de renseignements furent apportés en ce qui concerne les diverses formes de fours à arc.

BIBLIOGRAPHIE.

Dictionnaire des termes techniques de Télégraphie-Téléphonie français-anglais et anglais-français, par L. TISSOT-DUPONT; 1 vol. in-16 de 118 pages. Paris, H. Dunod et E. Pinat; 1919.

Le développement intense de certaines branches de la science et de l'industrie a naturellement pour conséquence l'accroissement de leur terminologie. D'où la nécessité de vocabulaires techniques mis à jour avec soin; nécessité aussi de composer de tels ouvrages en plusieurs langues, lesquels servent, en quelque sorte, de traits d'union entre les intéressés des divers pays.

Ce petit dictionnaire de télégraphie et de téléphonie français-anglais et anglais-français répond assez bien à ce *desideratum*, et sans prétendre à être absolument complet, il renferme tout au moins les termes les plus couramment usités dans ce domaine (T.S.F. comprise); à ce titre, il rendra sans aucun doute de nombreux services.

Unités électriques, par G. SZARVADY; 1 vol. in-8° de 94 pages.

Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1919.

Ce nouveau Traité des unités électriques se recommande de prime abord par son originalité et sa netteté d'exposition. Au surplus, chaque exposé de formule est généralement suivi d'un ou plusieurs exemples concrets, illustrant à souhait le jeu des formules. Ainsi présenté, le sujet devient aisément assimilable, et même attrayant.

La première Partie de l'Ouvrage traite de la Théorie des unités : (1° Grandeurs concrètes de même nature. Unités. Modules. — 2° Grandeurs concrètes de nature différente. Équations physiques. Passage d'un système à un autre. Formules de transformation. Équation de condition. — 3° Coefficients parasites. Équations de définition. Unités fondamentales. Unités dérivées ou absolues. — 4° Dimensions. Formules et équations de dimensions. — 5° Homogénéité des équations.)

La seconde Partie expose le système C.G.S. (1° Principe du système. Unités fondamentales. — 2° Unités C.G.S. mécaniques. Équivalent mécanique de la chaleur. — 3° Unités électromagnétiques. — 4° Unités pratiques. — 5° Unités particulières. — 6° Unités électrostatiques. — 7° Coefficients numériques de quelques relations dans le système électrostatique. — 8° Système électrostatique proposé par Clausius. — 9° Systèmes divers).

Une Notice historique relative au Système métrique, au système C.G.S., aux unités électriques et magnétiques et au Congrès international de 1881, forme la troisième et dernière Partie.

Enfin sont intercalés dans le texte des Tableaux fort clairs, donnant : les unités électromagnétiques, les unités pratiques, les unités dérivées du système pratique et non adoptées, les unités électrostatiques. Un Tableau général des unités électromagnétiques et électrostatiques complète la série.

La surchauffe de la vapeur. Ses avantages, (2^e édition), par l'INSTITUT SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIEL; 1 vol. grand in-8° de 100 pages et 65 figures. Paris, Librairie de l'I.S.I.; 1919.

L'intérêt de cette monographie, abondamment documentée et illustrée, n'échappera pas à tous ceux qui, ayant charge d'installations à vapeur, sont soucieux, à la fois, d'économie et de progrès. Si l'on songe, en effet, que l'emploi de la vapeur surchauffée est non seulement susceptible de procurer une respectable économie de combustible et d'eau, mais qu'il permet, à puissance calorifique égale, une réduction sensible des dimensions du matériel en jeu, il est naturel que nombre d'industries — mécaniques et chimiques notamment — n'hésitent point à le substituer désormais à l'emploi de la vapeur saturée.

Après un bref parallèle entre la vapeur saturée et la vapeur surchauffée, et un aperçu historique accompagné d'une copieuse bibliographie, l'Ouvrage traite successivement : de la surchauffe appliquée aux machines à vapeur et aux turbines, ainsi que de ses avantages économiques; des applications diverses de la vapeur surchauffée (industries métallurgiques et minières, chimiques, textiles, etc.); des inconvénients et difficultés dus à la surchauffe (action de la vapeur surchauffée sur les métaux, graissage et consommation de lubrifiants, garnitures de presse-étoupes); des généralités sur les surchauffeurs et leur emploi; des principaux types de surchauffeurs; des demi-fixes à vapeur surchauffée; des locomotives à vapeur surchauffée; enfin de l'emploi de la surchauffe dans la marine. Une Note relative aux propriétés de la vapeur surchauffée, une autre relative à la théorie de l'action de paroi, un supplément de références bibliographiques, puis une sorte de tableau synoptique donnant, par questions et réponses, des opinions autorisées sur la surchauffe de la vapeur, terminent cette intéressante brochure.

Schémas et règles pratiques de bobinage des machines électriques, par F. TORICES et A. CURCHOD; 1 vol. in-8° de 128 pages et 38 planches de schémas. Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1919.

Ce petit Volume est d'ordre purement élémentaire. Peu ou point de développements théoriques, et minimum de formules. C'est dire qu'il s'adresse surtout aux praticiens débutants, dont il facilitera grandement l'initiation toute première et la préparation à des études plus élevées et plus complètes.

L'Ouvrage comprend quatre Chapitres : I. Notions élémentaires de magnétisme et d'électricité. — II. Applications des phénomènes électromagnétiques et électrodynamiques. — III. Formules et définitions (A. Machines à courant continu. — B. Machines à courant alternatif). — IV. Schémas de bobinage.

Les divers schémas, extrêmement clairs, constituent autant de planches en regard desquelles se trouve une Notice courte mais suffisamment explicative.

En résumé, bon petit Ouvrage pratique, certain du succès auprès de ceux auxquels il est destiné.

Le tube Coolidge. Ses applications scientifiques, médicales et industrielles, par H. PILON;
1 vol. in-8° de 86 pages et 58 figures, Paris. Masson et C^{ie}; 1919.

Peu de sujets séduisent, passionnent même, savants et industriels, à l'égal du merveilleux instrument qu'est le » tube Coolidge », dont les applications, déjà innombrables en médecine et chirurgie, se multiplient par ailleurs de jour en jour. C'est ainsi que la radiologie est aujourd'hui du plus grand secours dans l'examen des métaux et des alliages, les expertises techniques, l'examen des insectes, des plantes, etc., toutes recherches que insuffisance des tubes à rayons X ordinaires eût rendu à peu près impossibles.

Or, si l'on a, certes, beaucoup dit et beaucoup écrit sur le tube Coolidge, il n'existait jusqu'ici, croyons-nous, aucun manuel à la fois théorique et pratique, traitant de ce précieux appareil. Il faut donc être reconnaissant à M. H. Pilon, l'habile constructeur et spécialiste connu, d'avoir, selon la juste formule des Éditeurs, « réuni, en une brochure élégante et claire, l'essentiel de ce que les physiciens et les médecins doivent connaître du tube Coolidge », savoir, en adoptant l'ordre même de l'Ouvrage :

I. Fonctionnement d'un tube ordinaire et d'un tube Coolidge. Différents modèles de tubes Coolidge. Montage, mise en marche et réglage du tube. — II. Précisions sur les propriétés du tube Coolidge. Rayonnement émis par un tube Coolidge. Émission de rayons X par d'autres points que le point d'impact. Fixité du point d'impact du tube Coolidge et sa comparaison avec les tubes ordinaires. — III. Critiques faites au tube Coolidge. Applications. Moyens de protection.

De nombreuses et remarquables figures concourent à l'attrait de cette utile et très opportune monographie.



INFORMATION.

L'Association française du Froid, qui s'est préoccupée, dès sa fondation d'instituer un enseignement professionnel destiné à assurer aux industries frigorifiques un personnel qualifié, vient de réorganiser ainsi l'enseignement créé avant la guerre.

A. Un cours de préparation aux examens pour le diplôme d'ingénieur-frigoriste sera professé à l'École supérieure d'Aéronautique et de Construction mécanique, à Paris.

Ce cours, qui commencera en décembre, pour finir en mars, est destiné à assurer la formation d'ingénieurs susceptibles d'être employés par les Maisons de construction de matériel frigorifique et par les Sociétés d'exploitation du Froid. Il s'adresse aux jeunes gens ayant déjà une sérieuse instruction scientifique générale et désireux de se spécialiser dans des industries appelées à jouer un grand rôle dans le développement économique du pays.

B. Un cours de préparation aux examens pour le certificat de mécanicien-frigoriste sera professé à la même École.

Ce cours, destiné à former le personnel mécanicien des exploitations frigorifiques, tant dans les installations terrestres que dans les installations à bord des navires, aura lieu successivement d'octobre à décembre et d'avril à juin.

Dans le courant de 1920, un nouveau cours, destiné à former des mécaniciens-frigoristes, sera ouvert à l'École des Apprentis mécaniciens de la Marine, au Havre.

Tous renseignements complémentaires peuvent être obtenus à l'Association française du Froid, 9, avenue Carnot, à Paris, ou à l'École supérieure d'Aéronautique, 92, rue de Clignancourt, Paris.

IL Y A TRENTÉ ANS.

Novembre 1889. — Sur la phonographie et la téléphonographie, par M. F. MERCADIER.
— Compte rendu du Congrès international des Électriciens.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886.



SIÈGE SOCIAL :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

LABORATOIRE :
12 ET 14, RUE DE STAËL
PARIS.

PRIX DE L'ABONNEMENT POUR UN AN (à partir de janvier)
PARIS 30 FR. | DÉPARTEMENTS ET UNION POSTALE. 32 FR.

Prix du numéro : 3 fr.

On s'abonne sans frais dans tous les Bureaux de poste

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, ÉDITEURS,

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1919

Ce Recueil paraît chaque mois.

La reproduction des Mémoires publiés dans le BULLETIN est subordonnée à l'autorisation du Comité et à l'assentiment des auteurs.
Les demandes de tirages à part doivent être faites en déposant les manuscrits.

Compagnie ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PARIS, 12, rue Portalis.

Usines au BOURGET (Seine) et à LYON.

Agences à BORDEAUX, LILLE, LYON, MARSEILLE, NANCY, NANTES

TURBINES A VAPEUR

Pour la *Commande de :*

Génératrices électriques.

Pompes.

Compresseurs. — Ventilateurs.

Pour la **Propulsion des Navires.**

Puissance totale des turbines
installées en France
par la **Compagnie Electro-Mécanique**
et ses Licenciés,

plus de 1.200.000 chevaux.

(Ce chiffre ne comprend pas les turbines
destinées à la propulsion des navires.)

MATÉRIEL ÉLECTRIQUE

Stations Centrales.

Transports de Force.

Traction électrique par courant
continu et par courant alternatif.

Éclairage électrique des trains.

Moteurs monophasés
et triphasés à collecteur.

Matériel de Mines.

Moteurs de Laminiers.

Réglage de vitesse des moteurs
polyphasés sans pertes d'énergie.

Compensateurs de phase.

Commutatrices.

ACCUMULATEURS ELECTRIQUES FULMEN

Bureaux et Usine : à CLICHY, 18, Quai de Clichy.

FILS ET CABLES
POUR L'ÉLECTRICITÉ

R. ALLIOT & ROL

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

38, rue de Reuilly, 38

PARIS

Tél. : ROQUETTE 03-30

CABLERIE DE JEUMONT

TUBES
ISOLATEURS
ISOLANTS MOULÉS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du mercredi 3 décembre 1919, p. 587. — Admission de Membres titulaires, p. 588. — Amplificateurs réciproques et réversibles pour lignes téléphoniques (M. Marius Latour), p. 589. — Sur le principe de relativité (M. Langevin), p. 601.

CORRESPONDANCE, p. 640.

COMPTE RENDU DE L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE EXTRAORDINAIRE DU 22 DÉCEMBRE 1919, p. 641.

IL Y A TRENTE ANS, p. 642.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES, p. 643

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS, p. 647.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 3 décembre 1919 (1).

PRÉSIDENCE DE M. MAZEN, *Président*.

La séance est ouverte à 20 h 30 m.

Le procès-verbal de la précédente réunion mensuelle est adopté.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Mac Grath (Maurice), Directeur de la Société « Le Matériel téléphonique », 46, avenue de Breteuil. — Présenté par M. le Général Ferrié et M. H. André.

Rechniewski (Robert-Camille), Ingénieur du Génie maritime, 107, quai d'Orsay, à Paris. — Présenté par MM. Maurice Leblanc et W.-C. Rechniewski.

Roche (Jean-Hughes-Gabriel), Chef du Bureau des études à la Société de Constructions des Batignolles, 176, avenue de Clichy, à Paris, 17^e. — Présenté par MM. Cathiard et Illovici.

Tumerelle (Adelin-Victor-Ghistain), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, 140, boulevard Magenta, à Paris. — Présenté par MM. Blondel et Mauduit.

Ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société française des Electriciens.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

AMPLIFICATEURS RÉCIPROQUES OU RÉVERSIBLES.

M. Marius LATOUR. — « Dans notre conférence du mois de juillet dernier, nous avons exposé comment les tubes à trois électrodes fonctionnaient en amplificateurs.

» On réalise avec ces tubes des appareils comportant essentiellement un transformateur d'entrée pour recevoir le courant à amplifier et un transformateur de sortie pour débiter le courant amplifié. On se rend immédiatement compte que ces appareils ayant une entrée et une sortie ne peuvent transmettre le courant téléphonique que dans un sens. Or, si l'on veut intercaler un semblable appareil sur une ligne téléphonique, il faut que la transmission téléphonique soit possible dans les deux sens et généralement avec amplification. En d'autres termes, il faut que le fonctionnement de l'appareil soit, comme nous avons essayé de l'exprimer en français, réciproque ou réversible. Des montages inédits d'appareils réciproques ou réversibles sont, du moins en ce qui nous concerne, encore à l'étude, mais il existe des montages qui ont déjà été expérimentés et mis en exploitation en France et à l'étranger et que nous allons vous présenter ce soir.

» Dans ces montages réversibles, il existe un élément permanent qui est l'audion même, y compris l'enroulement connecté à la

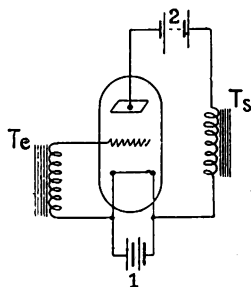


Fig. 1.

grille du transformateur d'entrée T_e et l'enroulement connecté à la plaque du transformateur de sortie T_s (voir *fig. 1*).

» Cet élément permanent étant donné, on peut faire passer le circuit de ligne soit dans le transformateur d'entrée, soit dans le transformateur de sortie.

» I. La figure 2 représente le cas où l'on fait passer la ligne dans

le transformateur de sortie ⁽¹⁾. On a supposé quatre enroulements distincts identiques dans le transformateur de sortie.

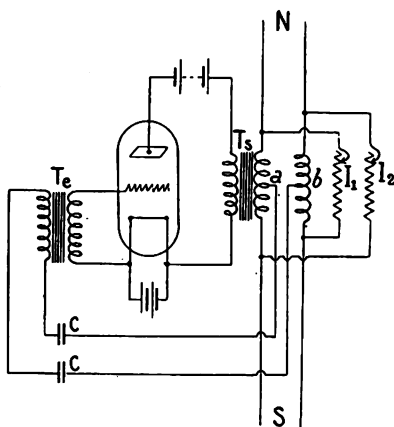


Fig. 2.

» Le sens d'enroulement est tel, chaque fois, que les effets de toutes les spires s'ajoutent lorsque le circuit de ligne est parcouru par un courant téléphonique. L'excitation du relais, c'est-à-dire l'alimentation du primaire du transformateur d'entrée, est faite en dérivation entre les points milieu *a*, *b*, à travers les capacités *C*. La présence de ces capacités a pour objet d'éviter que les courants de signalisation allant d'un poste terminus à l'autre et qui peuvent être des courants continus ou des courants à basse fréquence ne soient court-circuités à travers l'enroulement primaire du transformateur d'entrée; en effet, ce dernier étant établi pour une fréquence de l'ordre de 800 périodes a généralement une self-induction primaire faible ⁽²⁾.

» On remarque aussitôt que le courant amplifié est rendu en série sur la ligne téléphonique et que si les impédances des côtés nord et sud de la ligne sont les mêmes, les points *a* et *b* sont, au point de vue du débit du courant amplifié, au même potentiel. Il ne peut donc pas y avoir une relation inductive entre la sortie et l'entrée de l'amplificateur et l'appareil ne doit pas s'amorcer.

» Dès que les impédances sont inégales, il y a une réaction de la sortie sur l'entrée de l'appareil et il y a soit amorçage (l'appareil chante), soit amplification réduite, soit même désamplification.

⁽¹⁾ Ce montage réversible avec lampes à trois électrodes est décrit en particulier dans notre brevet anglais n° 131 639.

⁽²⁾ Cette disposition de capacités est indiquée dans notre brevet anglais n° 131 704.

L'équilibrage des côtés nord et sud de ligne est donc la grande affaire pour le bon fonctionnement du relais. Pour réaliser cet équilibrage en toute généralité, nous avons prévu la disposition additionnelle et simultanée de toutes combinaisons d'inductances, de capacités, de résistances en série et en dérivation sur les deux côtés de la ligne à la fois ⁽¹⁾.

» En outre, nous disposons des impédances réglables en diagonale I_1 et I_2 comme représenté sur la figure. On vérifie que ces impédances réunissent des points équipotentiels au point de vue du courant amplifié aussi longtemps que les impédances des côtés nord et sud de la ligne sont égales. Dès que les impédances de ligne sont inégales, il circule positivement des courants d'équilibre dans ces impédances qui améliorent la situation et tendent à réduire le déséquilibre.

» Les rapports de transformation du transformateur d'entrée et du transformateur de sortie dans le montage de la figure 2 se déterminent facilement en partant des formules que nous avons données dans notre dernière conférence ⁽²⁾.

» Soit Z l'impédance de chaque côté de la ligne; au point de vue du transformateur d'entrée, la source fictive qui l'alimente a une impédance $\frac{Z}{2}$. Si l'on désigne par r_g la résistance grille-filament ⁽³⁾, le rapport de transformation optimum sera donc

$$k_e = \sqrt{\frac{2 r_g}{Z}}.$$

» Au point de vue du transformateur de sortie, on voit que ce dernier débite sur un circuit d'impédance $2 Z$. Si l'on désigne par R_p la résistance plaque-filament, le rapport de transformation optimum du transformateur de sortie sera donc

$$k_s = \sqrt{\frac{2 R_p}{Z}}.$$

» Un relais équipé suivant le schéma de la figure 1 a été installé à Lyon, sur la ligne Paris-Marseille n° 3, construite avec un diamètre de fil de cuivre de 3,5 mm au lieu de 5 mm. Le fonctionnement

⁽¹⁾ Voir notre brevet anglais n° 131 639.

⁽²⁾ Voir aussi notre brevet anglais n° 127 318.

⁽³⁾ Cette résistance r_g tient compte de la résistance que l'on met en dérivation sur le circuit grille-filament lorsqu'on fait la grille négative.

de ce relais est toujours irréprochable et son emploi d'ailleurs pratiquement indispensable pour l'utilisation de la ligne.

» II. Au lieu de faire passer la ligne téléphonique dans le transformateur de sortie, on peut la faire passer dans le transformateur d'entrée. C'est ce que représente la figure 3. L'excitation du relais

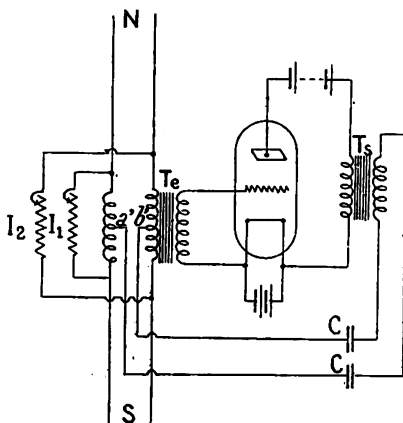


Fig. 3.

est alors faite en série, tandis que le courant amplifié est rendu en dérivation sur la ligne. Les capacités et les impédances de la figure 2 prennent alors les positions indiquées sur la figure 3. Les rapports de transformation des transformateurs d'entrée sont alors cette fois

$$k_e = \sqrt{\frac{r_g}{2Z}},$$

$$k_s = \sqrt{\frac{R_p}{2Z}}.$$

» On conçoit sans peine que l'on puisse avec les mêmes transformateurs d'entrée et de sortie passer d'un montage à l'autre, à la seule condition d'admettre la division des enroulements en quatre parties sur les deux transformateurs d'entrée et de sortie à la fois.

» Ces quatre parties d'enroulement seront tantôt utilisées suivant les dispositions des figures 2 ou 3, tantôt ramenées à un enroulement unique par la mise en série de deux groupes de deux parties en parallèle.

» La division des enroulements des transformateurs de sortie

en quatre parties est simplement faite pour avoir une double symétrie pour l'aller et le retour de la ligne, mais on peut aussi bien se contenter de la division en deux parties comme représentée

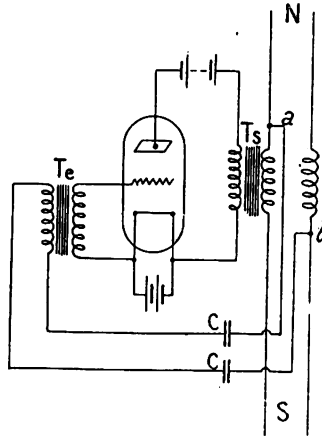


Fig. 4.

par les figures 4 et 5. La figure 4 correspond à la figure 2 et la figure 5 à la figure 3.

» On peut, ainsi que nous l'avons prévu, passer de la connexion

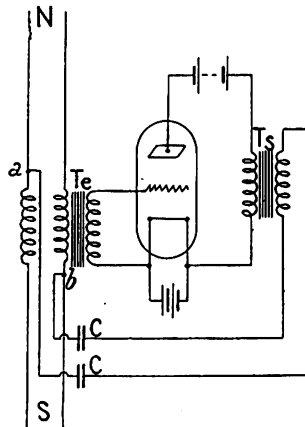


Fig. 5.

avec excitation du relais en dérivation à la connexion du relais avec excitation en série en construisant le transformateur d'entrée et le transformateur de sortie avec la simple division en deux enroulements. C'est ce que représentent les figures 6 et 7, où l'on voit comment les mêmes transformateurs d'entrée et de sortie sont uti-

lisés pour l'un et l'autre montage, et possèdent chaque fois des rapports de transformation appropriés.

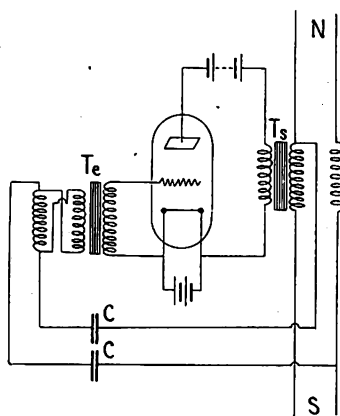


Fig. 6.

» Le passage d'un montage à l'autre peut parfois être une ressource contre les amorçages.

» Nous avons eu également de très bons résultats avec le montage

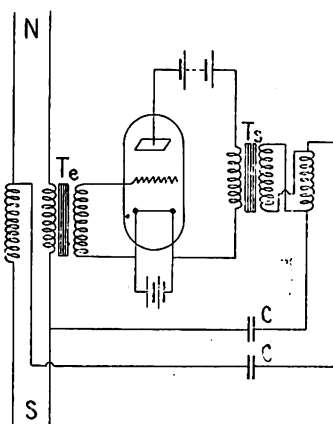


Fig. 7.

de relais correspondant à l'excitation série, notamment avec un relais installé à Troyes sur une communication réservée à l'Armée américaine.

» III. Dans les figures 2, 3, 4, 5, 6, 7, on a supposé que le relais était placé au milieu de la ligne de façon à disposer de deux impé-

dances sensiblement identiques de part et d'autre du relais. On peut reprendre tous ces montages en supposant qu'un des côtés du relais est branché en dérivation ou en série sur une ligne entière, et en un point quelconque, tandis que l'autre côté du relais est fermé sur une impédance locale ou ligne artificielle équivalant à la ligne réelle totale.

» La figure 8 représente, par exemple, l'utilisation dans ces

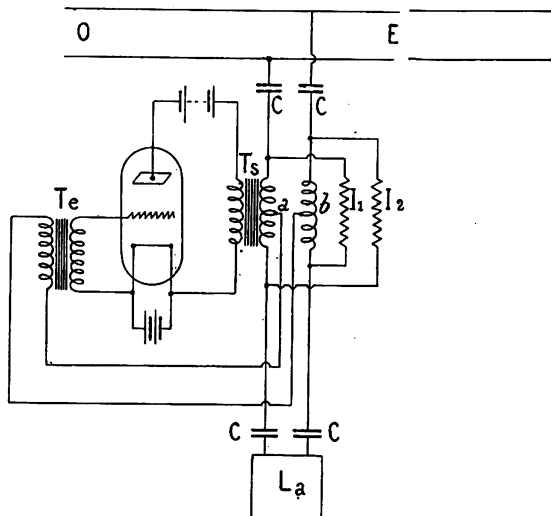


Fig. 8.

conditions du relais de la figure 2. Les côtés est et ouest de la ligne réelle sont montés en dérivation sur un des côtés du relais et l'autre côté du relais est fermé sur la seule ligne artificielle L_a d'impédance égale. Ces montages avec ligne artificielle unique ont été également essayés au Laboratoire de l'École supérieure des Postes et Télégraphes et en ligne.

» IV. Les montages décrits plus haut n'envisagent que l'emploi d'un seul relais, mais on peut utiliser ces mêmes connexions avec un jeu de deux relais et de deux lignes artificielles ayant respectivement la même impédance que les côtés nord et sud de la ligne réelle.

» La figure 9 représente le montage de deux relais à excitation shunt, la figure 10 le montage de deux relais avec excitation série. Les lignes artificielles sont indiquées sur les figures par L_a et L' .

» L'avantage de cette disposition est de donner deux réglages cumulatifs pour réaliser l'équilibrage. On vérifie sans peine qu'il suffit qu'une seule des lignes artificielles soit bien réglée sur l'im-

pédance du côté de la ligne réelle qu'elle doit équilibrer pour que

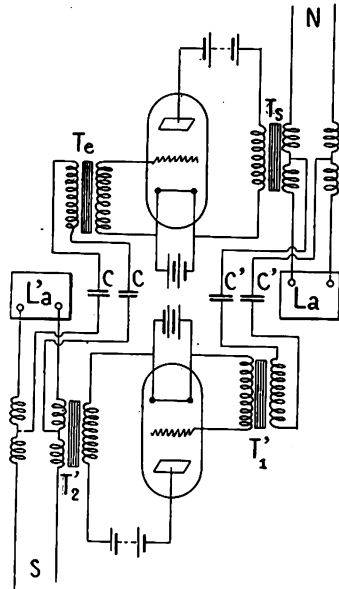


Fig. 9.

l'amorçage du système devienne impossible. En réglant séparé-

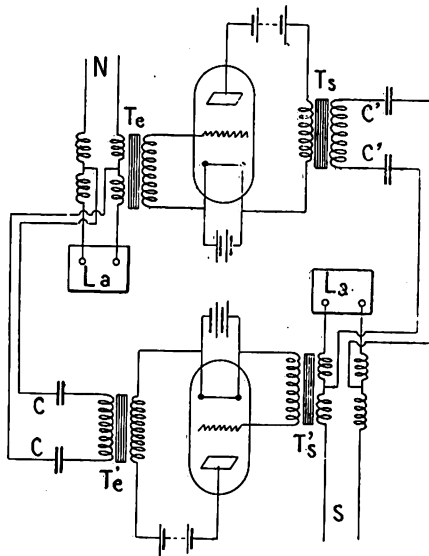


Fig. 10.

ment les deux lignes, on doit donc arriver à un réglage total plus

stable que dans le cas d'un seul relais. On utilisera par relais toutes les dispositions prévues plus haut pour réduire les chances d'amorçage, puisque chacun des relais n'est autre qu'un des types de relais étudié sous I et II.

» En réalité, dans un système à deux relais, les relais peuvent être disposés séparément en deux points différents de la ligne, l'amplification étant unilatérale en chacun de ces points. En particulier, nous nous sommes attaché depuis 1915 à réaliser des amplificateurs que nous avons désignés sous le nom d'*amplificateurs au départ*, destinés à être situés dans les postes terminus de la ligne téléphonique interurbaine. L'amplification à chaque poste se fait à l'émission sans avoir lieu à la réception, et l'on réalise alors de préférence le schéma de la figure 11.

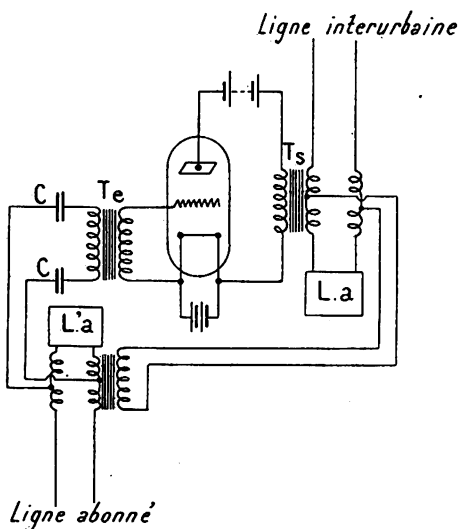


Fig. 11.

» Ce schéma comporte deux lignes artificielles dont l'une équilibre la ligne interurbaine et l'autre la ligne d'abonné. Cette disposition que nous avons étudiée et mise au point avec le capitaine Aymard présente l'avantage essentiel de l'amplification au départ, à savoir que la friture de la ligne est réduite relativement au volume de la parole.

» Des appareils basés sur ce principe ont donné d'excellents résultats dans des communications telles que Paris-Perpignan.

» Si un pareil système se répandait, il y aurait intérêt à uniformiser les lignes et appareils d'abonnés de façon à n'avoir pas à

toucher en aucun cas au réglage de la ligne artificielle équilibrant la ligne d'abonné.

» Cependant, le réglage seul de la ligne artificielle équilibrant la ligne interurbaine suffit à éviter tout amorçage.

» V. Tous les montages que nous venons de décrire ont été expérimentés et mis en exploitation en France par le Laboratoire de l'École supérieure des Postes et Télégraphes. Il existe un montage qui n'a pas été essayé bien que connu en France depuis 1913, c'est le montage du Hollandais van Kesteren et qui consiste en réalité à supprimer l'emploi des relais réversibles en doublant les fils de ligne. Ce montage n'est guère praticable que dans les câbles où le nombre de fils importe moins, et des expériences sur les lignes aériennes auraient été sans intérêt.

» La figure 12 représente une ligne interurbaine à quatre fils

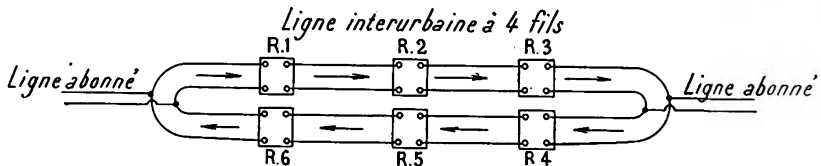


Fig. 12.

dans laquelle on introduit des relais ordinaires non réversibles R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , R_6 qui laissent passer la conversation téléphonique dans le sens indiqué par les flèches. Les lignes d'abonnés sont montées en dérivation ou en série sur le circuit d'ensemble et l'on se rend compte que, à chaque poste terminus, tandis que l'émission se fait par deux fils, la réception se fait par deux autres fils. On suppose bien entendu que l'amplification des relais n'est pas telle que le système s'amorce dans son ensemble. Mais, avant d'atteindre l'amorçage, il faut que les relais lèvent complètement l'affaiblissement de la ligne, ce qui représente déjà une audition supérieure.

» On peut utiliser le même système avec des lignes artificielles au poste terminus pour équilibrer les lignes d'abonné comme semblent le faire les Américains, par exemple suivant la figure 13. De cette façon, on n'a pas théoriquement à craindre d'amorçage du système quelle que soit l'amplification si l'équilibrage de la ligne d'abonné est parfait. Pratiquement, cet équilibrage n'est pas parfait parce que les lignes d'abonnés sont variables.

» Ces systèmes, comme nous l'avons dit plus haut, n'ont pu être essayés en France. Le fait, que l'on n'a point à redouter aussi vite les

amorçages dans les appareils non réversibles, fait que l'on peut travailler avec de plus fortes amplifications et il est possible que l'on

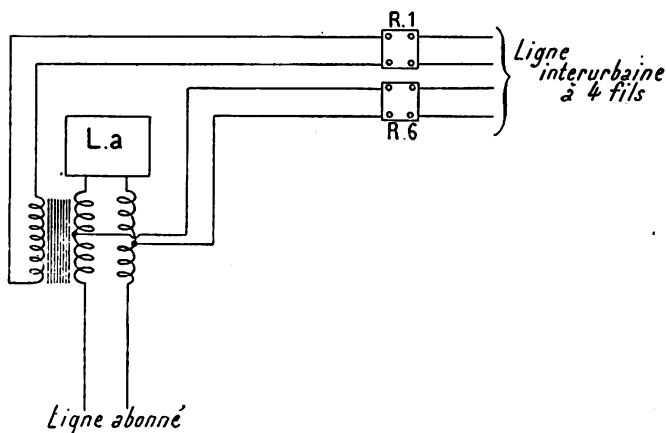


Fig. 13.

puisse se contenter de diamètres de fil donnant de plus forts affaiblissements et que l'inconvénient du plus grand nombre de fils soit compensé par la réduction du poids total de cuivre.

» Un avenir prochain nous apprendra certainement si, dans la construction des câbles téléphoniques à grande distance, le système à quatre fils doit l'emporter sur l'emploi des types de relais réversibles que nous avons décrits plus haut.

» Nous observerons seulement que les difficultés de fonctionnement dans les relais réversibles avec lampes à trois électrodes proviennent souvent d'amorçages parasites à haute fréquence. Les *filtres* de la Western Electric constitués par des lignes artificielles avec selfs et capacités, telles que représentées par la figure 14, et

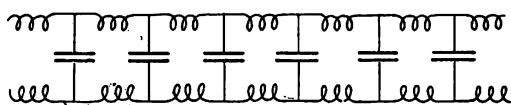


Fig. 14.

disposés à l'entrée ou à la sortie des amplificateurs ne constituent peut-être pas un remède suffisant. C'est sur cette question que nous aurons l'occasion de revenir. »

M. le PRÉSIDENT. — « La Communication si documentaire que

vous venez d'entendre, mes chers Collègues, nous permet de renouer connaissance avec le maître électricien qu'est M. Marius Latour. Il est d'ailleurs déjà pour la plupart d'entre nous une bien ancienne connaissance; pour la Société elle-même c'est là un de ses enfants; n'est-il pas en effet un ancien élève de notre École supérieure d'Électricité? et ce titre nous le rend doublement sympathique.

» Nous lui faisons donc en votre nom nos compliments les plus sincères pour avoir été à la fois si concis, si clair et si brillant. »

LE PRINCIPE DE RELATIVITÉ.

M. LANGEVIN. — « Messieurs, le 9 novembre dernier, la Société royale et la Société astronomique de Londres se réunissaient en séance solennelle, sous la présidence de Sir Joseph Thomson, pour recevoir communication des résultats obtenus par les deux expéditions chargées d'observer l'éclipse totale de Soleil du 29 mai 1919. Le but essentiel de ces expéditions était de vérifier les prévisions théoriques de M. Einstein sur la déviation de la lumière par le champ de gravitation du Soleil : une étoile vue dans une direction voisine du bord de l'astre devait paraître écartée de sa position normale d'un angle égal à $1''{,}74$ vers l'extérieur du Soleil.

» La vérification complète, qualitative et quantitative de cette prévision, venant après d'autres confirmations expérimentales non moins frappantes dont j'ai l'intention de vous entretenir ce soir, appelle vivement l'attention, même du grand public, si l'on en juge par les nombreux articles que lui a consacrés la presse anglaise, sur la théorie de la relativité grâce à laquelle ces résultats ont été obtenus.

» La puissance d'explication et de prévision de cette théorie, imposée par les faits et confirmée par eux, est aussi grande que sa structure logique est rigoureuse et belle. Son développement a été poursuivi, principalement par M. Einstein, avec une admirable continuité de pensée, en deux étapes principales : celle de la relativité restreinte de 1905 à 1912 et depuis 1912 celle de la relativité généralisée. La nouveauté et quelquefois l'étrangeté des conceptions auxquelles elle conduit rend particulièrement difficile sa pleine intelligence, mais son importance justifie largement l'effort qu'elle peut demander. Son étude est d'autant plus nécessaire qu'elle représente l'aboutissement actuel du travail progressif d'adaptation de la pensée aux faits et d'élimination des absolus arbitraires introduits dans les constructions provisoires par lesquelles la Science a tenté, avec un succès croissant, de représenter les lois de l'Univers.

I. — La relativité restreinte.

» 1. *La relativité en Mécanique.* — L'expérience montre que les phénomènes mécaniques se passent de la même manière lorsqu'ils

sont observés à partir de systèmes matériels en mouvement de translation uniforme les uns par rapport aux autres, qu'ils suivent les mêmes lois pour des observateurs liés à la Terre et pour d'autres opérant à l'intérieur d'un véhicule lancé à toute vitesse d'un mouvement uniforme. On peut encore dire qu'il *n'y a pas de translation absolue*, l'expérience ne peut mettre en évidence que le mouvement de translation relatif de deux portions de matière.

» La translation relative la plus rapide que nous ayons à notre disposition pour vérifier cette loi nous est fournie par le mouvement annuel de la Terre : à six mois d'intervalle, celle-ci se trouve dans deux positions diamétralement opposées sur l'orbite et des systèmes d'axes qui lui sont liés aux deux instants possèdent l'un par rapport à l'autre une vitesse relative de 60 km par seconde. S'il était possible, par d'autres expériences que celles de Mécanique, de définir des axes absolus et par rapport à eux le repos absolu, comme on a espéré pouvoir le faire en Optique et en Électricité au moyen de l'éther, milieu hypothétique à travers lequel se propagent les ondes lumineuses et se transmettent les actions électromagnétiques, la vitesse de translation de la Terre par rapport à ces axes changerait constamment au cours de l'année, et, quel que soit le mouvement du Soleil par rapport à eux, prendrait au moins un moment une valeur égale ou supérieure à 30 km par seconde, vitesse de la Terre par rapport au Soleil.

» Le fait que les lois de la Mécanique, au degré de précision des mesures, sont exactement les mêmes en janvier et en juillet met bien en évidence le caractère relatif de la translation.

» S'il n'y a pas, au moins en Mécanique, de translation absolue, il y a au contraire rotation absolue comme en témoignent les effets de force centrifuge en statique et de force centrifuge composée en dynamique. Des expériences faites à l'intérieur d'un système matériel permettent de mettre en évidence un mouvement de rotation d'ensemble.

» Il est nécessaire de voir comment la Mécanique rationnelle traduit dans ses formules cette relativité de la translation. Je définirai à ce propos quelques expressions qui nous seront utiles par la suite.

» 2. *L'Univers cinématique.* — La présence d'une portion de matière, d'un mobile par exemple, en un certain lieu à un certain instant est un *événement*. En général nous appellerons *événement* le fait qu'une chose matérielle ou non, portion de matière ou onde électromagnétique par exemple, se trouve ou passe en un lieu donné

à un instant donné. Nous appellerons *Univers* l'ensemble des événements. Pour repérer ceux-ci, nous pouvons faire choix de divers *systèmes de référence*, par exemple d'axes rectangulaires liés à un groupe donné d'observateurs. Pour ceux-ci, la situation de chaque événement sera caractérisée par quatre coordonnées, x, y, z, t , dont trois d'espace et une de temps. L'ensemble de toutes les situations possibles d'événements constitue l'*Univers cinématique* défini comme étant une multiplicité à quatre dimensions.

» Les coordonnées d'un même événement changent avec le système de référence, soit parce qu'on modifie l'orientation des axes, soit parce que cet événement est observé par différents groupes d'expérimentateurs, est rapporté à divers systèmes de référence en mouvement les uns par rapport aux autres. Nous supposerons toujours, au moins en relativité restreinte, que tous les observateurs emploient les mêmes unités, se servent, en particulier pour les mesures d'espace et de temps, de règles et d'horloges définies de la même manière.

» Le cas le plus simple, le seul que nous considérerons ici, est celui où les deux systèmes d'axes ont même orientation et une vitesse de translation relative uniforme v , dans la direction commune des x . Les origines O et O' des coordonnées d'espace sont supposées coïncider à l'origine du temps. Dans ces conditions, la cinématique ordinaire fournit les relations suivantes entre les coordonnées d'espace et de temps d'un même événement x, y, z, t pour l'un des systèmes et x', y', z', t' pour l'autre :

$$(1) \quad x = x' + vt', \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$

» Ces formules caractérisent une transformation faisant partie de ce que nous appellerons le *groupe de Galilée*. On entend par là que deux transformations successives de cette nature, correspondant à des vitesses v et v' , équivalent à une transformation unique de même forme avec une valeur de la vitesse égale à

$$(2) \quad v'' = v + v',$$

c'est, pour le cas simple actuel, la loi bien connue de composition des vitesses. Elle signifie encore qu'un mobile ayant dans la direction des x la vitesse v' par rapport au système O' a, par rapport au système O , dans la même direction une vitesse v'' définie par la formule (2).

» Ce groupe de Galilée possède les propriétés suivantes, fondamentales en cinématique ordinaire.

» *L'intervalle de temps entre deux événements a la même valeur dans tous les systèmes de référence (temps absolu). En particulier, la simultanéité a un sens absolu*, deux événements simultanés pour un groupe d'observateurs sont simultanés pour tous autres quel que soit leur mouvement par rapport aux premiers. *Le temps est un invariant du groupe de Galilée.*

» La distance dans l'espace de deux événements *simultanés* est la même pour tous les observateurs. La forme d'un corps, définie pour des observateurs par rapport auxquels il est en mouvement comme étant le lieu des positions simultanées des différents points de la surface du corps, est la même dans tous les systèmes de référence. L'espace, comme le temps, est le même pour tous.

» Au contraire, deux événements *successifs*, séparés par un intervalle de temps t , ont *une distance dans l'espace variable avec le système de référence*. Cela résulte immédiatement des formules⁽¹⁾ et peut s'illustrer par un exemple concret simple : un wagon se mouvant par rapport au sol avec la vitesse v porte une ouverture par laquelle les observateurs liés au wagon laissent tomber successivement deux objets à intervalle de temps t . Les deux événements que constituent les passages des objets par l'ouverture se passent au même point, ont une distance nulle dans l'espace pour les gens du wagon ; ils sont au contraire distants de vt dans l'espace pour des observateurs liés au sol.

» Le groupe de Galilée, qui caractérise la cinématique ordinaire, introduit ainsi entre la distance dans l'espace et l'intervalle dans le temps de deux événements quelconques une dissymétrie qui disparaît dans la cinématique nouvelle. Nous verrons que, pour celle-ci, l'intervalle dans le temps varie aussi bien que la distance dans l'espace avec le mouvement du système de référence.

» C'est seulement dans le cas où il y aurait coïncidence des événements dans l'espace et dans le temps, *coïncidence absolue* comme nous dirons, que la distance dans l'espace et l'intervalle dans le temps doivent s'annuler à la fois pour tous les groupes d'observateurs. Et il en sera nécessairement ainsi même en relativité généralisée puisque cette coïncidence complète des événements a un sens absolu, étant donné qu'un effet, un phénomène, en peut résulter sur l'existence duquel tous les observateurs seront nécessairement d'accord : par exemple les objets peuvent se briser par choc mutuel en passant en même temps par la même ouverture.

» Il est important de remarquer dès maintenant que toute notre expérience, *toutes les sensations par lesquelles nous percevons l'Univers, sont déterminées par de telles coïncidences absolues*, contact

de notre corps avec les objets ou coïncidence absolue d'un signal lumineux avec notre rétine. *Les liaisons causales que la mémoire et l'habitude nous permettent d'établir entre des séries de semblables coïncidences doivent avoir le même caractère absolu, et, comme toute notre science est fondée sur de telles constatations, les lois qui régissent l'Univers de notre expérience, le seul qui soit objet de science, doivent avoir ou pouvoir être mises sous une forme complètement indépendante du système de référence.* On voit apparaître ici l'idée profonde qui semble avoir guidé M. Einstein à travers toutes les difficultés de la seconde étape du développement de la relativité et lui a donné, avant le succès complet atteint seulement à la fin de 1915, la conviction profonde qu'il était possible et même nécessaire de donner aux lois de la physique une forme complètement invariante pour toutes les transformations qui permettent de passer d'un système de référence à un autre en mouvement *quelconque* par rapport au premier, et non plus seulement dans le cas du mouvement de translation uniforme auquel se limitait le principe de relativité restreinte.

» 3. *La Mécanique rationnelle.* — A la cinématique, définie par le groupe de Galilée, la Mécanique rationnelle associe tout d'abord les notions de masse et de force. La première y est considérée comme un invariant : la masse ou coefficient d'inertie d'une portion de matière est admise *a priori* comme constante, indépendante de l'état de repos ou de mouvement ou des changements d'état physique ou chimique que cette portion de matière peut subir. Le mouvement d'un point matériel est régi par, et la mécanique rationnelle est construite sur les équations fondamentales de la forme

$$(3) \quad m \frac{d^2 x}{dt^2} = F,$$

F étant la composante dans la direction des x de la force qui agit sur le point matériel.

» Si nous associons aux relations (1) la condition d'invariance de la masse

$$(4) \quad m = m',$$

et la condition qui traduit dans notre cas particulier le caractère vectoriel de la force

$$(5) \quad F = F',$$

nous obtenons, comme conséquence de (1), (3), (4) et (5),

$$(6) \quad m' \frac{d^2 x'}{dt'^2} = F',$$

c'est-à-dire que *les équations de la Mécanique conservent leur forme quand on passe d'un système de référence à un autre en mouvement de translation uniforme par rapport au premier*. Ce fait traduit analytiquement le caractère relatif du mouvement de translation uniforme en Mécanique.

» Cette invariance des lois de la Mécanique se traduit d'ailleurs par la possibilité d'en donner des énoncés *intrinsèques* grâce à l'introduction d'éléments *vectoriels* (vitesse, accélération, force, axes de couples, quantités de mouvement, moments de quantités de mouvement), *tensoriels* (moments d'inertie, déformations élastiques, tensions élastiques, etc.), ou *scalaires* (masse, énergie, etc.), sans qu'interviennent les coordonnées particulières dans un système de référence, de même que les invariants de la Géométrie pure (distances, angles, surfaces, volumes, etc.) permettent d'énoncer les lois de cette science sous une forme indépendante de tout système de coordonnées (relativité de l'espace).

» 4. *La relativité en Physique.* — On peut se demander si l'indifférence à une translation uniforme s'étend à l'ensemble des phénomènes physiques : il en doit être ainsi au point de vue mécaniste, si tout peut s'expliquer par espace et mouvement comme le pensait Descartes. Et en effet les expériences les plus délicates et les plus précises d'optique et d'électricité, reproduites à diverses époques de l'année pour toutes les orientations possibles des appareils, n'ont jamais décelé la moindre influence d'un changement de vitesse de translation d'ensemble ou, pour employer une expression courante, d'un changement de vitesse par rapport à l'éther.

» En présence du résultat négatif de toutes les tentatives faites dans ce but, il a paru naturel de généraliser et d'énoncer un *principe de relativité* restreinte sous la forme :

» *Il est impossible, par des expériences de physique intérieures à un système matériel, de mettre en évidence un mouvement de translation d'ensemble du système,*

ou encore de manière plus symétrique :

» *Les lois de la Physique sont les mêmes pour tous les systèmes de référence en translation uniforme les uns par rapport aux autres.*

» *Tout se passe pour chaque système de référence comme s'il était immobile par rapport à l'éther.*

» La théorie des ondulations en optique, sous la forme que lui a donnée Fresnel, est d'accord avec ce résultat pour ce qui concerne les expériences dites du premier ordre, c'est-à-dire celles dont la précision est comprise entre $\frac{1}{10\,000}$ (nombre égal au rapport à la vitesse de la lumière des 30 km par seconde que doit atteindre au moins un moment au cours de l'année, la vitesse de la Terre par rapport au milieu), et le carré de ce rapport, soit $\frac{1}{100\,000\,000}$ ou 10^{-8} .

» 5. *L'expérience de Michelson et la contraction de Lorentz.* — L'accord entre les faits et la théorie des ondulations de Fresnel, fondée sur la cinématique ordinaire, cesse lorsqu'on arrive aux expériences du second ordre. En particulier, la théorie prévoit que, pour des observateurs en mouvement par rapport à l'éther, la vitesse apparente de la lumière, mesurée par l'intermédiaire du temps d'aller et retour entre deux stations qui leur sont liées, doit varier avec la direction d'une quantité du second ordre : la variation relative, quand on passe d'une direction parallèle au mouvement dans l'éther à une direction perpendiculaire doit être égale à

$$\frac{1}{2} \frac{v^2}{V^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\beta^2}{2},$$

en posant

$$\beta = \frac{v}{V},$$

où v représente la vitesse du mouvement d'ensemble par rapport à l'éther de l'observateur avec ses appareils, et V la vitesse de la lumière par rapport au milieu.

» La célèbre expérience de Michelson consiste précisément dans la comparaison par les méthodes interférentielles des temps d'aller et retour de la lumière dans deux directions perpendiculaires. Si cette égalité a été réalisée pour une orientation déterminée des appareils, la théorie prévoit qu'elle doit être modifiée au second ordre d'une quantité pouvant aller jusqu'à β^2 quand on change cette orientation. Et comme nous avons vu qu'en raison du mouvement annuel de la Terre la vitesse de celle-ci par rapport au milieu doit, au moins une fois dans l'année, atteindre ou dépasser la valeur de 30 km par seconde, on doit, au moins une fois dans l'année, prévoir, par changement d'orientation des appareils, un déplacement des franges d'interférence égal au cent-millionième (10^{-8} du nombre de longueurs d'onde contenu dans chacun des deux trajets

d'aller et retour. Ce dernier nombre étant de 40 000 000 pour 22 m de trajet aller et retour, on aurait dû observer un déplacement d'au moins une demi-frange, alors que *l'expérience a donné un résultat constamment négatif* à la précision du centième de frange.

» Il y a là une contradiction formelle que Fitzgerald et Lorentz ont cherché à lever, tout en conservant la cinématique ordinaire, en admettant que la forme d'un corps en mouvement par rapport à l'éther change avec son orientation par rapport à la direction du mouvement : une dimension quelconque d'un corps quelconque doit se contracter dans le rapport $\sqrt{1-\beta^2}$ quand elle passe d'une direction perpendiculaire à la direction même du mouvement.

» Le souci de conserver la cinématique usuelle, ainsi que la notion de temps absolu dont elle dérive, oblige ainsi à introduire dans la géométrie et par suite dans toute la physique la complication suivante : des observateurs terrestres doivent se considérer comme contractés, ainsi que tous les objets qui leur sont liés, d'une quantité variable avec la saison, et d'ailleurs inconnue, dans une direction inconnue puisque nos mesures terrestres sont faites avec des règles dont nous devons supposer que leur longueur change aussi avec l'orientation de manière à masquer complètement pour nous l'effet de la contraction.

» Nous verrons également que la conservation du temps absolu et de la contraction de Lorentz au sens précédent donne aux équations de la physique, et en particulier à celles qui traduisent les lois de l'électromagnétisme, une forme compliquée et variable avec le mouvement supposé du système de référence par rapport à l'éther, *alors que l'expérience nous montre au contraire que ce mouvement d'ensemble est inaccessible et que les phénomènes se passent exactement de la même manière pour tous les systèmes quels que soient leurs mouvements de translation uniforme les uns par rapport aux autres.*

» Pour éviter ces complications arbitraires et ne rien introduire dans nos conceptions fondamentales qui ne soit l'expression aussi simple et immédiate que possible des faits, il a semblé beaucoup plus naturel de traduire le résultat de l'expérience de Michelson sous la forme suivante :

» *Pour tous les systèmes de référence en translation uniforme les uns par rapport aux autres, tels que ceux liés à la Terre aux différents instants de son mouvement annuel, la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions.*

» Cette loi particulière, conforme au principe de relativité restreinte énoncé plus haut, doit nous sembler d'autant plus nécessaire qu'elle se déduit immédiatement des lois générales de l'élec-

tromagnétisme telles que les ont établies Maxwell, Hertz et Lorentz. Ces lois sont vérifiées par tout l'ensemble des faits de l'électromagnétisme avec une précision qui, pour certains d'entre eux, atteint le second ordre, à quelque moment de l'année que les expériences soient faites et par conséquent quel que soit le mouvement d'ensemble du système de référence auquel les observateurs sont liés. Nous sommes aujourd'hui certains que l'optique est un chapitre de l'électromagnétisme depuis les confirmations décisives et nombreuses de la théorie électromagnétique de la lumière.

» Or les équations de Maxwell impliquent, comme conséquence immédiate, que toutes les perturbations électromagnétiques se propagent dans le vide avec une même vitesse précisément égale pour toutes les directions à la vitesse de la lumière, et mesurée par le même nombre quel que soit le mouvement des observateurs pourvu que ceux-ci emploient toujours les mêmes unités de longueur et de temps.

» 6. *La cinématique nouvelle et le groupe de Lorentz.* — Il est facile de voir que le point de vue nouveau est incompatible avec la cinématique ordinaire : imaginons par exemple une onde lumineuse ou électromagnétique et deux groupes d'observateurs se mouvant l'un par rapport à l'autre avec une vitesse v dans la direction normale au plan de l'onde : nous venons d'être conduits à affirmer que pour les uns comme pour les autres celle-ci se propage avec une même vitesse V , alors qu'au point de vue ancien, la propagation se fait pour les uns avec la vitesse V elle doit se faire pour les autres avec la vitesse $V - v$ ou $V + v$ suivant le sens du mouvement relatif.

» La traduction immédiate des faits qui nous a donné les énoncés nouveaux exige que nous abandonnions la notion du temps absolu sur laquelle repose la cinématique ordinaire pour n'introduire plus qu'un temps relatif, l'intervalle de temps entre deux événements étant, comme leur distance dans l'espace, mesuré de manières différentes par des observateurs en mouvement relatif.

» Il est facile de voir que, dans le cas simple où deux groupes d'observateurs choisissent un même événement origine et des directions d'axes parallèles avec celle des x dans la direction de leur mouvement relatif, les coordonnées d'espace et de temps d'un même événement noté x, y, z, t par les uns (observateurs O) et x', y', z', t' , par les autres (observateurs O') doivent avoir entre elles les relations suivantes pour satisfaire à la condition de propagation isotrope de la lumière avec la vitesse V à la fois pour O et O' ainsi

qu'au principe de relativité restreinte

$$(3) \quad \begin{cases} x = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x' + vt'), \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t' + \frac{v}{V^2}x'\right), \end{cases}$$

en posant toujours

$$\beta = \frac{v}{V}.$$

» Ces transformations forment encore un groupe puisque deux transformations successives de vitesses v et v' équivalent à une transformation unique de même forme et de vitesse v'' donnée, comme un calcul facile permet de s'en assurer, par la relation

$$(4) \quad v'' = \frac{v + v'}{1 + \frac{vv'}{V^2}} \quad \text{ou} \quad \beta'' = \frac{\beta + \beta'}{1 + \beta\beta'}.$$

» On donne à ce groupe le nom de groupe de Lorentz pour la raison suivante : M. Lorentz a montré le premier que les équations de l'électromagnétisme conservent leur forme quand on y effectue pour les coordonnées d'espace et de temps la substitution (2) en même temps que des substitutions analogues pour les autres grandeurs (champ électrique et champ magnétique) qui y figurent.

» Cette propriété remarquable n'est autre chose que l'expression mathématique du fait que les lois de l'électromagnétisme et de l'optique sont les mêmes pour les observateurs O et O', que les équations qui traduisent ces lois doivent se présenter sous la même forme pour les uns comme pour les autres à condition que chacun utilise les mesures que l'expérience lui permet de faire.

» Cette concordance ne peut nous surprendre puisque nous avons vu comment les équations de l'électromagnétisme impliquent l'uniformité de propagation de la lumière dans toutes les directions et que nous avons obtenu la transformation (3) à partir de cette conséquence considérée directement comme un fait expérimental.

» Il est facile de voir également que, si l'on veut conserver la notion du temps absolu et le groupe de Galilée (1) qui en dérive, les équations de l'électromagnétisme prennent au contraire des formes différentes pour les observateurs O et O' : ces équations ne conservent pas leur forme pour les substitutions du groupe de Galilée. La cinématique ordinaire ne peut interpréter le caractère relatif

des lois de l'électromagnétisme et de l'optique. Elle oblige les observateurs terrestres, s'ils veulent tenir compte du changement continu de leur vitesse relative, à modifier constamment et à prendre sous une forme compliquée les lois de l'électromagnétisme, et ceci en opposition avec les faits que traduisent exactement ces équations sous leur forme simple habituelle grâce à l'introduction du temps relatif.

» Ceci revient encore à dire que le temps, introduit de manière inconsciente par les fondateurs de l'électromagnétisme et avec eux par tous les électriciens lorsqu'ils utilisent à tout moment les lois fondamentales de Maxwell-Hertz sous leur forme ordinaire, n'est autre que le temps relatif dont la mesure varie suivant les observateurs conformément aux relations (3).

» La cinématique conforme à ces relations est la cinématique des électriciens, comme celle définie par (1) est celle des mécaniciens; la différence résulte du fait que les équations de l'électromagnétisme conservent leur forme pour les transformations du groupe de Lorentz, tandis que celles de la mécanique conservent la leur pour les transformations du groupe de Galilée.

» Là se trouve la raison profonde de l'impossibilité dans laquelle se sont trouvés les physiciens, malgré les efforts puissants et prolongés des plus illustres d'entre eux, de donner une interprétation mécanique des phénomènes électriques et optiques. D'équations qui se conservent pour le groupe de Galilée, comme celles de la mécanique, il est impossible, par voie de combinaison analytique, de déduire des lois qui, comme celles de l'électromagnétisme, se conservent pour les transformations du groupe de Lorentz.

» L'origine de cette opposition va nous apparaître plus clairement encore dans un instant.

» Remarquons d'abord que les deux transformations (1) et (3) diffèrent très peu l'une de l'autre pour les valeurs ordinaires de v qui sont très petites par rapport à la vitesse de la lumière. La transformation de Galilée (1) n'est autre chose que la forme limite de la transformation de Lorentz (3) quand on suppose dans cette dernière que la vitesse V devient infinie, ce qui revient à donner dans (3) la valeur zéro à β . On retombe ainsi sur les relations (1).

» A cette remarque correspond le fait que la vitesse de la lumière dans le vide V joue pour la cinématique nouvelle le rôle que joue la vitesse infinie pour la cinématique ordinaire.

» Un peu d'attention montre que cette différence a son origine dans la définition même de la notion de temps et de la simultanéité d'événements distants dans l'espace. La notion du temps absolu et

d'une simultanéité indépendante du système de référence n'aurait de sens expérimental que si nous disposions d'un moyen de signaler instantanément à distance, sous forme d'ondes se propageant avec une vitesse infinie, de mobiles se mouvant avec une vitesse infinie, ou par l'intermédiaire du fil inextensible ou du solide invariable qui peuvent être mis en mouvement simultanément en tous leurs points, c'est-à-dire dans lesquels les déformations se propagent avec une vitesse infinie. Ces diverses notions, temps et simultanéité absolus, propagation instantanée à distance, solide invariable, sont ainsi connexes et caractérisent la Mécanique rationnelle au point de vue cinématique.

» Au contraire, admettre que la lumière se propage avec la même vitesse dans toutes les directions pour tous les systèmes de référence revient à dire que dans chacun de ces systèmes la correspondance des temps en des points différents, la synchronisation des horloges, est réalisée au moyen de signaux lumineux ou électromagnétiques (ondes de télégraphie sans fil) qui se propagent avec une vitesse finie, celle de la lumière. Le temps utilisé par chacun des groupes d'observateurs est ainsi le *temps optique* ou électromagnétique, et la vitesse de la lumière, qui intervient dans la définition même du temps, joue par là même un rôle particulier qui explique son introduction dans les formules des transformations (3) permettant de passer d'un système de référence à un autre.

» L'affirmation que la vitesse de la lumière est la même pour tous les systèmes de référence revient donc à celle-ci : la seule mesure du temps qui soit accessible à l'expérience, le seul moyen que nous ayons de synchroniser des horloges à distance, nous est fourni par l'intermédiaire des signaux lumineux ou électromagnétiques. Nous posons en principe qu'aucun autre procédé expérimental ne pourra nous fournir une mesure différente par des observations intérieures au système matériel auquel nous sommes liés.

» Le caractère arbitraire de la cinématique habituelle tient à ce qu'elle repose sur la possibilité d'une signalisation instantanée à distance, sans que l'expérience vienne autoriser une telle hypothèse.

» Par opposition, la cinématique nouvelle prend directement appui sur les faits et ne fait intervenir dans la définition du temps lui-même que des possibilités expérimentales immédiates, telles que la synchronisation à distance par l'intermédiaire de signaux *réels*.

» 7. *Actions à distance et actions de contact.* — Nous nous trouvons

ainsi conduits à remarquer que ces modifications profondes, introduites dans nos conceptions les plus fondamentales par la théorie de la relativité, représentent une phase décisive du conflit séculaire entre les idées d'action à distance et d'action au contact.

» La Mécanique céleste s'est développée depuis Newton grâce à la loi d'actions en raison inverse du carré de la distance. Cette loi est adéquate à la Mécanique rationnelle puisqu'elle admet la possibilité d'une action à distance déterminée par la position *actuelle* du corps attirant, c'est-à-dire d'une action instantanée à distance. Le succès remarquable de cette conception en Astronomie a eu pour conséquence qu'au XVIII^e et dans la première partie du XIX^e siècle la Physique presque entière s'est développée dans cette direction, sur le modèle pourrait-on dire de la Mécanique céleste. Les lois de Coulomb en électricité et en magnétisme sont la transposition immédiate de la loi de Newton, la loi de Laplace en électromagnétisme est aussi une loi d'action instantanée ainsi que les lois électrodynamiques d'Ampère.

» Le point de vue opposé est celui de l'action de proche en proche : introduit tout d'abord par Huygens en optique sous la forme de la théorie des ondulations, il fut développé par Fresnel avec une puissance d'intuition extraordinaire, qui permit à ce grand physicien de tourner des difficultés aujourd'hui encore insurmontables quand on n'adopte pas franchement le point de vue de la théorie électromagnétique de la lumière.

» La raison profonde de ces difficultés, dont un exemple nous a été fourni par l'interprétation du résultat négatif de l'expérience de Michelson, est que la théorie de Fresnel est en réalité une théorie hybride. Elle admet un milieu dans lequel les actions optiques se transmettent de proche en proche et s'efforce en même temps de traduire les propriétés de ce milieu dans le langage de la Mécanique rationnelle, langage fondé sur la conception d'action instantanée à distance. L'hybride fut fécond, mais le déséquilibre profond dû à son origine vient se manifester pleinement aujourd'hui grâce à la précision accrue de nos méthodes expérimentales.

» Au contraire, la notion d'action de proche en proche s'est développée pleinement sous une forme pure dans le domaine électromagnétique depuis Faraday, et a trouvé son expression mathématique dans un système d'équations complété par Maxwell grâce à l'introduction du courant de déplacement. La facilité extraordinaire avec laquelle la théorie électromagnétique supprime toutes les difficultés inhérentes à la théorie de Fresnel et avec laquelle nous la voyons traduire le fait expérimental de la relativité nous apporte

simplement, dans un sens favorable aux actions de contact, la réponse à cette question posée depuis Newton : les actions entre particules matérielles se transmettent-elles instantanément à distance ou seulement de proche en proche avec une vitesse finie caractéristique de l'espace vide interposé.

» Notre affirmation que *la seule cinématique ayant un sens expérimental, et aussi grâce à laquelle les lois de la Physique prennent une forme simple indépendante du système de référence, est la cinématique du groupe de Lorentz*, prend ainsi une signification plus nette et plus profonde et vient s'appuyer largement sur toute l'histoire de la Physique.

» 8. *La composition des vitesses.* — Mettons tout d'abord en évidence le rôle particulier que joue la vitesse de la lumière dans la cinématique de la relativité. On voit immédiatement que les relations (3) n'ont de sens que si $\beta < 1$, c'est-à-dire si les deux systèmes de référence ont une vitesse relative v inférieure à la vitesse de la lumière, ce qui revient à dire que deux portions de matière ne peuvent se mouvoir l'une par rapport à l'autre avec une vitesse égale ou supérieure à celle de la lumière. Ceci résulte en effet de la loi de composition des vitesses que donne la formule (4) et qui se réduit à la loi ordinaire (2) quand on y suppose V infini. Cette formule (4), caractéristique du groupe de Lorentz, peut encore s'obtenir en considérant un mobile dont la vitesse par rapport aux observateurs O' a pour composante dans la direction des x

$$v' = \frac{dx'}{dt'}$$

et dont la vitesse par rapport aux observateurs O a pour composante dans cette même direction

$$v'' = \frac{dx}{dt}$$

» Il suffit de différencier la première et la dernière des relations (3) et de diviser membre à membre pour retrouver, avec la signification un peu différente qui vient d'être indiquée, la loi nouvelle de composition de vitesses

$$v'' = \frac{v + v'}{1 + \frac{vv'}{V^2}}$$

» Il est facile de vérifier sur cette formule que *la composition*

d'un nombre quelconque de vitesses inférieures à V donne toujours une vitesse inférieure à V et par conséquent qu'un mobile, par accroissements successifs à partir du mouvement antérieurement acquis, ne pourra jamais atteindre la vitesse de la lumière.

» 9. *Les rayons β du radium.* — Une première vérification expérimentale de ce résultat va nous être apportée par l'observation des mouvements les plus rapides que nous connaissions : les rayons β du radium sont constitués par des particules cathodiques chargées négativement et dont la vitesse peut être mesurée, ainsi que le rapport de leur charge à leur masse en utilisant la déviation de ces rayons par des champs électrique et magnétique connus. Les résultats obtenus, par Danysz en particulier, montrent que ces particules β présentent toute une série de vitesses et que celles-ci convergent vers la vitesse de la lumière, s'accumulant au-dessous de celle-ci puisqu'on a pu observer jusqu'à 297 000 km par seconde, mais sans l'atteindre et encore moins la dépasser.

» 10. *L'entraînement des ondes.* — Une confirmation non moins remarquable, et qui attira vivement l'attention des physiciens lorsqu'elle fut signalée par M. Einstein dès 1906, résulte de la simplicité extraordinaire avec laquelle la nouvelle loi de composition rend compte de la loi d'entraînement des ondes lumineuses par les milieux réfringents en mouvement sous la forme prévue par Fresnel et vérifiée expérimentalement par Fizeau.

» Si n est l'indice de réfraction du milieu matériel transparent pour les ondes considérées, la vitesse U' de ces ondes par rapport au milieu est donnée par

$$U' = \frac{V}{n},$$

conformément au résultat des mesures directes de Foucault sur la vitesse de la lumière. Si le milieu est en mouvement avec la vitesse v par rapport à des observateurs, l'expérience de Fizeau montre que la vitesse des ondes par rapport à ceux-ci est

$$U'' = U' + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right).$$

» Au point de vue de la cinématique ancienne, il faut, pour avoir U'' composer avec U' une fraction seulement $1 - \frac{1}{n^2}$ de la vitesse d'entraînement v . C'est la loi d'entraînement partiel des ondes, plus singulière encore quand on l'énonce comme faisait Fresnel en

disant que le milieu réfringent entraîne partiellement l'éther qu'il renferme, cet entraînement partiel variant avec la fréquence des ondes propagées puisque l'indice n dépend de cette fréquence.

» Appliquons au contraire la nouvelle loi (4) de composition en faisant v' égal à U' , c'est-à-dire en composant la vitesse relative U' des ondes avec la vitesse d'entraînement v ; il vient

$$U'' = \frac{U' + v}{1 + \frac{U'v}{V^2}} = U' + v \left(1 - \frac{U'^2}{V^2} \right) = U' + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

en limitant le développement aux termes du premier ordre. La loi d'entraînement n'a qu'une signification purement cinématique, immédiate et simple au possible.

» 11. *Le temps et l'espace relatifs.* — Dégageons quelques aspects particulièrement remarquables de la cinématique nouvelle.

» La relation

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \left(t' + \frac{v x'}{V^2} \right)$$

montre que, contrairement à ce qui se passe en cinématique ordinaire, l'intervalle de temps entre deux événements (par exemple entre l'événement origine et l'événement noté x, y, z, t) n'est pas mesuré de la même manière par les observateurs O et O', puisque t est différent de t' (sauf, comme il est facile de s'en assurer, lorsque x' et t' sont simultanément nuls, c'est-à-dire lorsqu'il y a coïncidence absolue des deux événements au sens que j'ai indiqué plus haut).

» Si, pour les observateurs O', les deux événements coïncident dans le temps, c'est-à-dire sont simultanés ($t' = 0$), sans coïncider dans l'espace (x' différent de zéro), t est différent de zéro, c'est-à-dire que les événements ne sont pas simultanés pour les observateurs O.

» De même la formule

$$x = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} (x' + v t')$$

montre que pour $t' = 0$ on a

$$x = \frac{x'}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

c'est-à-dire que deux événements simultanés pour les observateurs O' ont pour ceux-ci une distance dans l'espace (x') plus petite dans le rapport $\sqrt{1 - \beta^2}$ que pour d'autres observateurs O en mouve-

ment de translation par rapport à eux avec la vitesse $v = \beta V$. En particulier, supposons les observateurs O liés à une règle parallèle à la direction du mouvement relatif et qui pour eux a la longueur x . Pour les observateurs O', cette règle est mobile par rapport à eux et sa longueur est définie comme la distance x' dans l'espace entre les événements que sont les présences *simultanées* (pour eux) des deux extrémités de la règle. En vertu de la relation précédente, on aura

$$x' = x \sqrt{1 - \beta^2}.$$

» Cette relation est d'ailleurs réciproque : si la règle était liée aux observateurs O', sa longueur pour les observateurs O par rapport auxquels elle est mobile serait la distance dans l'espace des deux événements simultanés pour eux ($t = 0$) et l'on aurait

$$x = x' \sqrt{1 - \beta^2}.$$

» Ceci est la forme sous laquelle la contraction de Lorentz intervient dans la cinématique nouvelle : elle est réciproque puisqu'il résulte de ce qui précède que si deux règles égales glissent l'une contre l'autre avec la vitesse v , des observateurs liés à l'une quelconque des règles voient l'autre plus courte que la leur.

» On voit que cette contraction n'a plus le caractère absolu que lui donnait la cinématique ordinaire : elle résulte simplement de la manière différente dont les deux groupes d'observateurs définissent la simultanéité et du fait, sur lequel j'insiste, que la forme d'un corps en mouvement ne peut être définie que comme le lieu des positions simultanées des différents points de ce corps. Si des observateurs en mouvement relatif ne définissent pas de la même manière la simultanéité, il n'est pas surprenant qu'ils ne voient pas la même forme au même corps.

» Deux événements simultanés pour les observateurs O' ($t' = 0$) et distants pour eux de x' dans l'espace ont ainsi pour les observateurs O un intervalle dans le temps et une distance dans l'espace donnés par

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \frac{v x'}{V^2}, \quad x = \frac{x'}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

d'où

$$x = \frac{V^2}{v} t = \frac{V t}{\beta} > V t.$$

» Il résulte de cette inégalité que le caractère relatif de la simultanéité n'est pas en contradiction avec le principe de causalité si nous admettons, ce qui est conforme à notre hypothèse fondamen-

tale sur la mesure du temps, qu'aucun signal ne peut se propager avec une vitesse supérieure à celle de la lumière. Pas plus pour les observateurs O' , pour lesquels les deux événements sont simultanés, que pour les observateurs O , pour lesquels leur distance x dans l'espace est supérieure au chemin parcouru par la lumière pendant leur intervalle dans le temps t , un lien de cause à effet ne pourra être établi entre eux. Il n'y a donc aucune difficulté logique à ce que leur ordre de succession puisse être modifié par un changement du système de référence.

» Si, au contraire, les deux événements sont tels que pour un système de référence quelconque on ait $x < Vt$, c'est-à-dire tels qu'un signal lumineux permette au premier d'influer sur le second, il est facile de voir, d'après les équations (3), que cette inégalité subsiste pour un système quelconque en mouvement par rapport au premier : l'ordre de succession des deux événements a un sens absolu dès qu'un lien causal peut être établi entre eux par l'intermédiaire d'un signal lumineux ou de tout autre procédé moins rapide que la lumière.

» Les mêmes conséquences peuvent s'obtenir peut-être plus simplement en remarquant que la transformation (3) laisse invariante l'expression

$$(5) \quad s^2 = V^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

ou, s'il s'agit d'événements infiniment voisins, l'expression

$$(6) \quad ds^2 = V^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2,$$

c'est-à-dire qu'on a identiquement

$$ds^2 = V^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = V^2 dt'^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2.$$

» Cet invariant joue, dans la théorie de la relativité, un rôle analogue à celui de la distance de deux points en géométrie. Il est caractéristique du groupe de Lorentz, et celui-ci peut s'obtenir, sous sa forme la plus générale, par la condition de conserver leur forme aux expressions (5) ou (6). De même, en géométrie analytique, les formules qui permettent de passer d'un système de coordonnées rectangulaires à un autre peuvent s'obtenir sous leur forme la plus générale par la condition de laisser invariante l'expression de la distance entre deux points en fonction de leurs coordonnées.

» *De même encore que la géométrie affirme l'existence d'un espace indépendant des systèmes particuliers de coordonnées qui servent à en repérer les points, et permet d'en énoncer les lois sous une forme*

intrinsèque grâce à l'introduction d'éléments invariants (distances, angles, surfaces, volumes, etc.), la physique, par l'intermédiaire du principe de relativité affirme l'existence d'un Univers indépendant du système de référence qui sert à repérer les événements.

» Le principe de relativité, sous la forme restreinte comme sous la forme plus générale que nous examinerons tout à l'heure, n'est donc, au fond, que l'affirmation de l'existence d'une réalité indépendante des systèmes de référence en mouvement les uns par rapport aux autres à partir desquels nous en observons des perspectives changeantes. Cet univers a des lois auxquelles l'emploi des coordonnées permet de donner une forme analytique indépendante du système de référence bien que les coordonnées individuelles de chaque événement en dépendent, mais qu'il est possible d'exprimer sous forme intrinsèque, comme la géométrie le fait pour l'espace, grâce à l'introduction d'éléments invariants et à la constitution d'un langage approprié. C'est la tâche qui s'impose actuellement aux physiciens : constituer une physique qui soit, à l'expression analytique actuelle des lois de l'Univers conforme au principe de relativité, ce que la géométrie pure est à la géométrie analytique.

» L'invariant que nous venons de rencontrer sous les formes (5) ou (6) est le plus fondamental et correspond à la distance en géométrie.

» 12. *La possibilité d'influence ou d'action.* — Il importe, à titre d'exemple, d'insister sur la signification physique de ce premier invariant. Si deux événements sont tels que leur distance dans l'espace (dont les composantes sont x, y, z) est inférieure au chemin Vt parcouru par la lumière pendant leur intervalle dans le temps, s^2 est positif et il en résulte, à cause de l'invariance de s^2 , que la relation qui vient d'être énoncée entre les deux événements a un sens absolu, qu'elle est satisfaite dans tous les systèmes de référence d'où l'on peut observer les deux événements considérés. Quand cette condition est remplie, c'est-à-dire quand s est réel, un signal ou un messenger se déplaçant moins vite que la lumière permet à l'un des événements d'intervenir comme cause dans les conditions qui déterminent le second. Il est facile de voir d'après les formules du groupe de Lorentz que dans ce cas, conformément au principe de causalité, l'ordre de succession des deux événements a un sens absolu, aucun changement du système de référence ne permet d'inverser cet ordre ni de voir les deux événements simultanés.

» Au contraire, quand s^2 est négatif ou s imaginaire, la distance

dans l'espace des deux événements est plus grande que le chemin Vt parcouru par la lumière pendant leur intervalle dans le temps (cette relation a un sens absolu) et aucun lien causal ne peut exister entre les deux événements dont l'ordre de succession peut, sans contradiction avec le principe de causalité, être renversé par un changement convenable du système de référence et n'a pas de sens absolu.

» La quantité s est donc réelle ou imaginaire suivant que l'un des événements peut ou non influencer sur l'autre; elle est nulle quand un signal lumineux dont l'émission coïncide dans l'espace et dans le temps avec l'un des événements peut juste coïncider au passage avec l'autre. On peut donc dire que cette quantité mesure la *possibilité d'influence ou d'action* (au sens cinématique) des deux événements l'un sur l'autre.

» 13. *La loi d'inertie ou d'action stationnaire.* — Comme exemple de la possibilité indiquée plus haut d'atteindre, grâce à l'introduction de semblables invariants, des énoncés *intrinsèques et simples* pour les lois de la physique ou de la mécanique, voyons comment l'invariant fondamental s ou ds permet d'exprimer la loi d'inertie.

» Considérons deux événements A et B dont la possibilité d'influence S soit réelle; puis que leur distance dans l'espace est inférieure au chemin parcouru par la lumière pendant leur intervalle dans le temps, il existe une infinité de mouvements possibles pour un mobile qui, partant du premier A (il y en a un qui est le premier dans le temps au sens absolu puisque l'ordre de succession est invariable quand s est réel) passe par le second B. En appelant *ligne d'Univers* l'ensemble des événements que représentent les diverses positions successives d'un mobile, nous pouvons encore énoncer ceci en disant : lorsque deux événements ont une possibilité d'influence réelle, il y a une infinité de lignes d'univers réelles passant par ces deux événements, exactement comme dans l'espace une infinité de lignes réelles passent par deux points dont la distance est réelle. La quantité qui correspondra ici à la longueur d'une de ces lignes, et qui sera la *possibilité d'action* le long d'une ligne d'univers passant par les deux événements, aura pour expression

$$(7) \quad I = \int_A^B ds,$$

l'intégrale étant étendue à tous les couples d'événements infiniment voisins qui se succèdent le long de cette ligne.

» En géométrie, il y a une ligne qui se distingue de toutes les autres passant par les deux mêmes points : c'est la droite, qui jouit de la propriété de longueur minimum, ce minimum étant précisément égal à la distance des deux points.

» Un calcul très simple, qui utilise la définition (6) de ds , montre que l'intégrale I est *stationnaire* et passe par un maximum égal à s pour la ligne d'univers qui correspond à *un mouvement rectiligne et uniforme, c'est-à-dire à un mobile se mouvant entre les deux événements conformément à la loi d'inertie.*

» Cette loi a donc, pour énoncé intrinsèque et simple,

$$(8) \quad \delta \int ds = 0.$$

» On remarquera que cet énoncé *d'action stationnaire* a précisément la forme hamiltonienne et fait jouer, dans l'Univers de la relativité, au mouvement rectiligne et uniforme le rôle que joue la droite en géométrie euclidienne. On peut encore dire, sous une forme plus générale, que le mouvement d'un point matériel libre, que la ligne d'univers de ce point est une *géodésique* tracée dans la multiplicité à quatre dimensions qu'est l'ensemble des événements ou Univers. On voit déjà que, loin de compliquer les choses, notre principe de relativité, par la symétrie qu'il introduit entre les coordonnées d'espace et de temps contrairement à ce qui se passe en cinématique ordinaire, permet d'obtenir des énoncés remarquablement simples quand on a réussi à dégager les invariants nécessaires. Nous verrons d'autres exemples de cette puissance de simplification.

» 14. *Le temps propre.* — Nous pouvons encore donner de l'invariant fondamental une autre interprétation dans le cas où il est réel. Imaginons pour cela que des observateurs soient liés au mobile dont la ligne d'univers passe par les deux événements considérés : pour eux les deux événements se passent au même point puisque tous deux coïncident avec leur présence, de sorte que si $d\tau$ est la mesure *faite par eux* de l'intervalle de temps entre les deux événements supposés par exemple infiniment voisins, on a, comme conséquence de la formule (6), en tenant compte du fait que pour les observateurs considérés la distance dans l'espace est nulle,

$$(9) \quad ds^2 = V^2 d\tau^2 \quad \text{ou} \quad ds = V d\tau.$$

» Nous donnerons à $d\tau$ le nom, qui s'impose d'après ce qui pré-

cède, de *temps propre* du mobile entre les deux événements qui se succèdent au même point par rapport à lui. La possibilité d'influence entre deux événements, lorsqu'elle est réelle, est donc proportionnelle, avec le coefficient V , à l'intervalle de temps mesuré entre ces événements par des observateurs en mouvement rectiligne et uniforme tel que les deux événements se passent pour eux au même point.

» Si leur ligne d'univers n'est pas celle d'un mouvement libre, on a, le long de cette ligne,

$$(10) \quad \int_A^B ds = V \int_A^B d\tau.$$

» C'est donc le mouvement rectiligne et uniforme qui donne, d'après la propriété reconnue plus haut, le maximum de temps propre entre deux quelconques des événements par lesquels il passe. On peut encore s'en rendre compte de la manière suivante. Considérons d'autres observateurs O que ceux liés au mobile. Pour eux, celui-ci a une certaine vitesse v à l'instant t , et l'on a, d'après la définition de ds^2 ,

$$ds^2 = V^2 dt^2 - v^2 dt^2 = V^2(1 - \beta^2) dt^2,$$

d'où

$$(11) \quad d\tau = \sqrt{1 - \beta^2} dt$$

et

$$\int_A^B d\tau = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - \beta^2} dt,$$

où t_1 et t_2 sont les instants auxquels se passent les événements extrêmes A et B pour les observateurs O . La présence du facteur $\sqrt{1 - \beta^2}$ montre que plus le mouvement entre A et B différera d'un mouvement rectiligne et uniforme, plus par conséquent les vitesses seront grandes puisque la durée totale $t_1 - t_2$ est fixe, et plus l'intégrale entre ces limites fixes sera petite.

» La loi d'inertie peut encore s'exprimer comme *loi du temps propre maximum*, et elle nous apparaît comme liée de façon nécessaire aux conclusions suivantes, dont l'aspect semble plus paradoxal encore que celles relatives à la simultanéité et à la contraction apparente réciproque des corps en mouvement.

» Imaginons deux portions de matière dont les lignes d'univers se croisent en deux événements A et B , c'est-à-dire qui se séparent en A pour se retrouver en B , mais dont l'une se meut entre A et B

d'un mouvement rectiligne et uniforme, tandis que l'autre a un mouvement varié, subit des accélérations. Il résulte de ce qui précède que l'intervalle de temps, la durée de la séparation, mesuré par la seconde est moindre que pour la première. Et si nous admettons, conformément au principe de relativité, qu'aucune autre mesure du temps n'est possible, il en résulte que la seconde a, dans l'intervalle, moins vieilli que la première. On peut déduire de là des conséquences amusantes qui ne sont en opposition avec aucun fait expérimental. Un peu d'attention montre d'ailleurs que la mise en œuvre de cette possibilité de ralentir le cours du temps grâce à une agitation suffisante obligerait à réaliser des vitesses du même ordre que celle de la lumière; elle ne présente par conséquent aucun intérêt pratique.

» 15. *La dynamique de la relativité.* — Revenons à des conséquences plus facilement vérifiables par l'expérience.

» A la nouvelle cinématique correspond une dynamique nouvelle, entièrement compatible avec les lois de l'électromagnétisme puisque ses équations conserveront leur forme pour les mêmes transformations de coordonnées, celles du groupe de Lorentz.

» Étant donné, comme nous allons le voir, que les faits imposent cette nouvelle dynamique, il serait important d'orienter l'enseignement de la mécanique ordinaire dans un sens ménageant la possibilité de passer à la mécanique nouvelle avec le minimum de changements. Or, il est facile de montrer que le principe de relativité, joint au principe de conservation de l'énergie, fournissent, quand on admet la cinématique de Galilée, toutes les lois fondamentales de la mécanique rationnelle, en particulier la conservation de la masse, introduite d'ordinaire comme un postulat indépendant, et celle de la conservation de la quantité de mouvement.

» Il suffit de remplacer la cinématique de Galilée par celle du groupe de Lorentz, c'est-à-dire d'introduire la mesure optique du temps, pour obtenir une nouvelle dynamique qui, chose tout à fait remarquable, est plus simple que celle de la mécanique rationnelle. En effet, elle réunit en un seul l'ensemble des principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. *Elle affirme pour un système matériel isolé la constance d'un vecteur d'Univers à quatre composantes, dont les trois composantes d'espace sont les quantités de mouvement et dont la composante de temps est l'énergie.*

» De plus, et ceci est l'aspect peut-être le plus remarquable, *la notion de masse se confond avec celle d'énergie* : la masse d'un système

matériel n'est plus qu'une quantité proportionnelle à son énergie interne avec un coefficient de proportionnalité égal au carré de la vitesse de la lumière. Entre la masse m d'une portion de matière définie comme coefficient de proportionnalité de la quantité de mouvement à la vitesse et son énergie totale E , on a la relation

$$(12) \quad m = \frac{E}{V^2},$$

de sorte que la masse varie avec l'énergie et ne reste constante pour un système fermé que grâce à l'absence d'échange avec l'extérieur, par voie de rayonnement par exemple.

» 16. *Variation de la masse avec la vitesse.* — L'énergie totale d'un corps augmente avec sa vitesse d'une quantité égale à l'énergie cinétique. Si E_0 est l'énergie interne du corps (mesurée par des observateurs qui lui sont liés) et par conséquent

$$m_0 = \frac{E_0}{V^2}$$

sa masse au repos, ce que nous appellerons sa *masse initiale*, la théorie montre que son énergie mesurée par des observateurs qui le voient en mouvement avec une vitesse $v = \beta V$ a pour valeur

$$(13) \quad E = \frac{E_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

» L'énergie cinétique prend la valeur

$$E - E_0 = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$$

qui, pour les petites valeurs de β , se confond, comme on le voit immédiatement en développant l'expression précédente suivant les puissances de β , avec l'énergie cinétique² ordinaire

$$\frac{1}{2} E_0 \beta^2 = \frac{1}{2} m_0 v^2.$$

» A la valeur (13) de l'énergie correspond, en vertu de la relation (12), une valeur de la masse m :

$$(14) \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

» L'accroissement de masse avec la vitesse ainsi prévu par la

théorie de la relativité est lié au fait que l'énergie cinétique existe, que l'énergie totale d'un corps en mouvement est plus grande que celle du même corps au repos et n'est qu'un aspect particulier de la loi fondamentale d'*inertie de l'énergie* exprimée par la formule (12).

» 17. *Vérifications expérimentales.* — La variation de masse ainsi prévue ne devient sensible que pour des vitesses du même ordre que celle de la lumière et donne une masse infinie quand v tend vers V . C'est là l'aspect dynamique du résultat cinématique limitant à V la vitesse relative que peuvent prendre deux portions de matière : il faudrait une énergie infinie pour atteindre cette limite.

» Pour obtenir une vérification expérimentale, il est nécessaire de s'adresser aux projectiles les plus rapides que nous connaissions, aux rayons cathodiques et aux rayons β des corps radioactifs. En observant la déviation par un champ magnétique connu de rayons cathodiques produits sous une différence de potentiel connue entre la cathode et le lieu d'observation, on peut obtenir deux relations entre la vitesse des particules cathodiques et le rapport de leur charge à leur masse initiale m_0 . Comme il est nécessaire d'ailleurs, pour conserver leur forme aux équations de l'électromagnétisme, d'admettre que la charge électrique reste invariante quand on passe d'un système de référence à un autre en mouvement par rapport à lui, ces deux relations s'écrivent, dans la dynamique de la relativité,

$$(15) \quad \left\{ \begin{array}{l} Ue = m_0 V^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \\ \text{et} \\ HR = \frac{mv}{e} = \frac{m_0 \beta V}{e \sqrt{1-\beta^2}}. \end{array} \right.$$

» La première équation exprime que l'accroissement d'énergie cinétique de la particule est égal au travail effectué par le champ électrique sur sa charge, U représentant la différence de potentiel dont on se sert pour produire les rayons cathodiques, et la seconde relie le champ magnétique H supposé perpendiculaire à la direction de la vitesse au rayon de courbure R de la trajectoire. L'élimination de β entre ces deux relations montre suivant quelle loi doivent varier simultanément la différence de potentiel et le champ magnétique (ou l'intensité du courant qui produit ce dernier) pour que la déviation reste constante.

» Des expériences très soignées faites récemment sous cette

forme par MM. Ch.-Eug. Guye et Lavanchy ont exactement vérifié la loi prévue pour des vitesses de rayons cathodiques allant jusqu'à 150000 km par seconde, moitié de la vitesse de la lumière.

» Les rayons β des corps radioactifs permettent, comme nous l'avons vu, d'opérer avec des vitesses beaucoup plus grandes, mais la précision est moindre parce que la première des relations (15) doit être remplacée par une autre déduite de la déviation des rayons sous l'action d'un champ électrique perpendiculaire à leur direction. Cette dernière mesure est moins facile que celle d'une différence de potentiel. Néanmoins, au degré de précision des mesures, les formules de la nouvelle dynamique représentent encore exactement les faits et correspondent, pour les rayons les plus rapides étudiés, à une valeur de la masse m décuple de la masse initiale.

» 18. *La structure des raies de l'hydrogène.* — Une confirmation au moins aussi remarquable et tout à fait imprévue a été apportée en 1916 par M. Sommerfeld.

» On sait que, grâce à l'application de la théorie des quanta aux mouvements des électrons intérieurs aux atomes, des progrès considérables ont pu être faits dans l'interprétation et dans la prévision des séries de raies dans le spectre d'émission des éléments. En particulier, le modèle proposé par M. Bohr pour l'atome d'hydrogène (un seul électron négatif tournant autour d'un noyau central positif) donne exactement la série de raies connue sous le nom de série de Balmer.

» Lorsque, au lieu de supposer, comme l'avait fait M. Bohr, que l'électron décrit des orbites circulaires, on admet avec M. Sommerfeld la possibilité d'orbites elliptiques et qu'on leur applique les procédés récents qui ont permis d'étendre la théorie des quanta à de semblables problèmes, on retrouve toujours cette même série de Balmer avec une fréquence bien définie pour chaque raie.

» Or l'expérience montre que les raies de la série de Balmer ont une structure, très fine à la vérité. Chaque raie possède un certain nombre de composantes très rapprochées dont deux particulièrement intenses et leur intervalle a pu être mesuré par les méthodes basées sur la variation de visibilité des franges d'interférence avec la différence de marche. Les mesures de MM. Buisson et Fabry ont donné pour la raie rouge (α) de l'hydrogène un écartement voisin de trois centièmes d'unité Angström.

» Comme les vitesses que prévoit la théorie pour les diverses orbites possibles de l'électron dans l'atome d'hydrogène représentent déjà une fraction sensible de la vitesse de la lumière, M. Som-

merfeld s'est demandé si la substitution de la mécanique de la relativité à la mécanique ordinaire employée jusque-là dans les problèmes de ce genre ne permettrait pas de résoudre la difficulté.

» Le succès de cette idée a été remarquable. *La nouvelle dynamique donne exactement la structure observée pour les raies de la série de Balmer.*

» De plus, elle prévoit que les rayons de Röntgen caractéristiques émis par les atomes des divers éléments doivent présenter dans leur spectre des structures analogues avec un écart de fréquence entre les composantes d'autant plus considérable que le rang de l'atome est plus élevé dans la série des éléments. Appliquée aux rayons de Röntgen caractéristiques les plus pénétrants, à ceux qui constituent le groupe des raies K, la théorie de M. Sommerfeld présente un accord remarquable avec l'expérience, bien que l'écart en question varie dans un rapport voisin de 100 000 000 quand on passe de la raie α de l'hydrogène aux raies K de l'uranium qui en sont l'équivalent déplacé vers les grandes fréquences.

» Il est donc établi que les problèmes relatifs aux mouvements intra-atomiques exigent l'emploi de la nouvelle dynamique pour donner des solutions en accord avec les faits.

» 19. *Les petits écarts à la loi de Prout.* — La relation (12) d'inertie de l'énergie comporte d'autres conséquences remarquables.

» On sait que l'hypothèse de l'unité de la matière, d'après laquelle les atomes seraient construits à partir d'un élément fondamental, probablement l'hydrogène, comporterait, au point de vue de la mécanique rationnelle, la conséquence connue sous le nom de loi de Prout, d'après laquelle les masses atomiques de tous les éléments devraient être des multiples entiers de celle de l'hydrogène.

» L'unité de la matière semble d'ailleurs de plus en plus vraisemblable : les transformations radioactives nous montrent que des atomes lourds peuvent émettre successivement plusieurs atomes d'hélium en se simplifiant ; d'autre part, Sir Ernest Rutherford vient de montrer que le choc d'une particule α (atome d'hélium lancé pendant la transmutation spontanée d'atomes radioactifs) contre le noyau d'un atome d'azote en peut détacher un atome d'hydrogène. Enfin les cas comme celui du chlore (masse atomique 35,5) où un écart important existe avec un multiple entier de l'hydrogène semblent devoir s'expliquer par l'existence d'un mélange d'éléments *isotopes* doués des mêmes propriétés chimiques mais de masses atomiques différentes. La méthode des rayons positifs imaginée par Sir Joseph Thomson vient en effet de permettre le dédoublement

du chlore en deux éléments isotopes de masses atomiques très voisines de 35 et 37, ainsi que celle du néon en deux éléments de masses 19 et 21.

» Mais les travaux de Stas ont montré que de petites différences subsistent, que les masses atomiques des éléments les plus simples sont *très voisins* de multiples entiers de celle de l'hydrogène.

» Or il suffit d'admettre que la formation d'atomes complexes à partir de l'élément simple s'accompagne de variations d'énergie interne par rayonnement *du même ordre que celles auxquelles nous assistons au cours des transformations radioactives*, pour rendre compte quantitativement de ces écarts par application de la formule (12), d'après laquelle la variation de masse s'obtient en divisant par le carré de la vitesse de la lumière la variation d'énergie interne par rayonnement.

II. — La relativité généralisée.

» 20. *La pesanteur de l'énergie.* — Si l'on réfléchit d'ailleurs que cette inertie de l'énergie donne l'interprétation la plus simple de la pression de rayonnement puisque l'énergie, si elle est inerte, doit quand elle se propage sous forme de rayonnement transporter de la quantité de mouvement, et par conséquent pousser les obstacles qu'elle rencontre et donner lieu au recul d'une source qui rayonne de manière non symétrique, on voit quelle puissance de simplification et d'explication possède la nouvelle dynamique, la seule qui soit compatible avec les équations de l'électromagnétisme.

» Une remarque très simple va nous servir de transition entre la relativité restreinte, grâce à laquelle les résultats précédents ont été obtenus, et le développement tout à fait général que M. Einstein vient de donner aux conséquences du principe de relativité.

» Nous venons de voir vérifiée par les faits la loi d'inertie de l'énergie, la variation de masse d'un corps avec son énergie totale. Mais, d'autre part, les expériences les plus précises, celles d'Eotvös en particulier qui ont atteint le vingt-millionième, montrent que le poids d'un corps est exactement proportionnel à sa masse, que l'accélération de la pesanteur est la même pour tous les corps. Si donc la masse (inertie) change avec l'énergie interne, le poids doit changer aussi exactement dans le même rapport : *si l'énergie est inerte, elle doit être en même temps pesante*. Nous pouvons remarquer en particulier que les petits écarts sur les masses atomiques, résultant des variations d'énergie interne pendant la formation

des atomes, se constatent en réalité au moyen de mesures de poids.

» Il est donc vraisemblable que l'énergie rayonnante, la lumière en particulier, qui se comporte comme inerte, doit se comporter comme pesante, d'où l'idée qu'un rayon lumineux doit s'incurver dans un champ de gravitation.

» La première forme sous laquelle cette idée a été développée par M. Einstein se présentait de manière naturelle, au moins en apparence. On pouvait supposer que la lumière serait déviée comme un mobile se mouvant avec la vitesse V . L'énormité de cette vitesse fait que la courbure dans le champ de pesanteur terrestre serait absolument insensible. Le Soleil, au contraire, possède une masse suffisante pour dévier appréciablement un rayon lumineux passant à proximité suffisante. Un calcul très simple, la recherche de l'angle des asymptotes de la trajectoire hyperbolique suivie par un mobile dont la vitesse à grande distance du Soleil serait V , montre que la déviation produite a pour valeur

$$(16) \quad \alpha = \frac{2GM}{RV^2},$$

où G est la constante de la gravitation, M la masse du Soleil, R la distance minimum de la trajectoire au centre du Soleil. Pour un rayon passant exactement au bord du Soleil, l'emploi des valeurs connues pour les quantités figurant dans la formule (16) donne pour α la valeur

$$\alpha = 0''87.$$

» Une étoile voisine du bord du Soleil devrait donc en paraître plus éloignée qu'elle n'est en réalité, d'une quantité un peu inférieure à une seconde d'arc, c'est-à-dire accessible à l'expérience pendant une éclipse totale qui permet seule de photographier les étoiles voisines du bord du Soleil.

» Des expéditions, empêchées par la guerre, avaient été prévues pour vérifier ce fait sur l'éclipse totale du 19 août 1914. Depuis cette époque, M. Einstein a réussi de manière complète à développer les conséquences du principe de relativité sous sa forme la plus générale et s'est trouvé conduit, à la fin de 1915, en suivant la voie que je vais essayer d'indiquer brièvement, à prévoir une déviation exactement double de celle qu'il avait obtenue par ce raisonnement provisoire, soit $1''{,}74$ pour une étoile vue tout près du bord du Soleil.

» On peut tout d'abord remarquer que ce raisonnement simpliste présente ce même caractère hybride que nous avons reconnu à la théorie optique de Fresnel : il associe le point de vue de la propa-

gation des ondes lumineuses, exactement régi par les lois de l'électromagnétisme qui se conservent pour les transformations du groupe de Lorentz et sont l'expression pure de la notion des actions de proche en proche à travers l'espace, avec celui de la mécanique rationnelle, celui des actions instantanées à distance, en appliquant la loi de gravitation de Newton. Ici encore la vérité se trouve dans le développement logique des idées fondamentales.

» 21. *Le boulet de Jules Verne.* — La gravitation se trouvant ainsi, pour la première fois, amenée en contact ou en liaison avec les phénomènes électromagnétiques ou optiques par l'idée que la lumière ou l'énergie rayonnante doit se comporter comme pesante, M. Einstein en déduit naturellement que, pour des observateurs liés à la Terre, l'expression immédiate des faits qui se passent à leur voisinage doit être que la lumière ne se propage pas en ligne droite, pas plus qu'un mobile lancé et abandonné à lui-même ne se meut d'un mouvement rectiligne et uniforme, ne satisfait à la loi d'inertie, puisqu'il est dévié par la pesanteur. Le champ de pesanteur nous apparaît comme la cause commune de ces écarts à partir des lois simples prévues par la théorie de la relativité restreinte pour un Univers régi par les lois de l'électromagnétisme sous leur forme habituelle et que nous appellerons un *Univers euclidien* à cause de l'analogie signalée plus haut avec la géométrie euclidienne. Un Univers euclidien est caractérisé par le fait qu'il existe une infinité de systèmes de référence, en mouvement de translation uniforme les uns par rapport aux autres, pour lesquels nos postulats fondamentaux sur la propagation isotrope de la lumière, sur la possibilité d'une mesure optique du temps et sur l'exactitude des lois de l'électromagnétisme sont vérifiés. Dans un tel Univers et pour les systèmes de référence appropriés, la lumière se propage en ligne droite et un mobile libre se meut d'un mouvement rectiligne et uniforme.

» L'Univers réel ne remplit pas ces conditions, au moins pour un système de référence lié à la Terre. Il pourrait cependant les remplir par rapport à d'autres systèmes en mouvement convenable (autre qu'une translation uniforme) par rapport à la Terre, et être par suite euclidien.

» On peut en effet trouver, au moins localement, c'est-à-dire pour une région de l'Univers suffisamment limitée dans l'espace et dans le temps, une solution à cette question par l'intermédiaire du boulet de Jules Verne.

» A l'intérieur d'un projectile lancé sans rotation et par consé-

quent se mouvant en chute libre, la pesanteur n'existe pas et l'Univers est euclidien. En effet, tous les objets qu'il peut renfermer étant soumis, en vertu de la loi de constance de g rappelée plus haut, à une même accélération d'ensemble, tombant tous de la même manière et indépendamment les uns des autres, il n'y a ni haut ni bas pour des observateurs intérieurs au projectile et aucun effort n'est nécessaire pour maintenir un corps libre immobile par rapport aux parois.

» Pour un système de référence lié à ces parois, la pesanteur a disparu, un mobile libre se meut d'un mouvement rectiligne et uniforme, et il est naturel d'admettre que la lumière à l'intérieur se propage en ligne droite, que l'Univers est euclidien.

» L'emploi d'un système de référence en mouvement uniformément varié par rapport à la Terre permet donc de supprimer le champ de gravitation, mais il est visible que ce résultat n'est obtenu que localement puisque le champ de gravitation terrestre n'est pas uniforme. Pour un boulet de Jules Verne voisin d'un point de la Terre, le champ de pesanteur n'existe pas à son intérieur ni à son voisinage immédiat, mais il existe à distance là où g commence à varier appréciablement en grandeur ou en direction. Nous exprimerons ce fait en disant *qu'il y a un Univers euclidien tangent en tout point et en tout lieu à l'Univers réel* : c'est dans une petite étendue autour d'eux celui d'observateurs en chute libre et sans rotation rapportant les événements à des axes qui leur sont liés. Cette notion est, comme nous allons le voir, tout à fait voisine de celle que Gauss a mise à la base de sa théorie des surfaces en admettant l'existence en tout point d'une surface d'un plan tangent confondu avec la surface dans une étendue infiniment petite pour laquelle la géométrie est la géométrie plane conforme en particulier au postulatum d'Euclide, alors que, pour une étendue finie considérée sur la surface, les lignes qu'on y peut tracer n'obéissent pas aux lois de la géométrie euclidienne : les géodésiques ou lignes de plus courte distance n'y sont pas des droites et leurs propriétés correspondent, comme on voit, à une géométrie qui n'est pas euclidienne à moins que la surface ne soit développable, applicable sur un plan.

» Le fait essentiel qui résulte de la remarque précédente est que, étant donnés deux événements infiniment voisins, il existe des systèmes de référence, ceux d'observateurs en chute libre au voisinage immédiat de ces événements, par rapport auxquels peut se mesurer, au sens de la relativité restreinte, l'élément invariant ds que nous avons appelé la possibilité d'action de ces deux événements. De la même manière l'hypothèse de Gauss sur l'existence du

plan tangent en tout point d'une surface comme celle de la Terre permet d'appliquer aux mesures faites dans une étendue limitée la géométrie euclidienne du plan et, en particulier, d'exprimer la longueur ds d'un arc de courbe infiniment petit tracé sur la surface en l'assimilant à un élément de droite situé dans le plan tangent.

» Mais inversement, si l'emploi d'un système de référence approprié permet de faire disparaître le champ de gravitation dans une région limitée de l'Univers, l'emploi d'un système de référence en mouvement quelconque est exactement équivalent à l'introduction d'un champ de gravitation approprié, toujours comme conséquence de la proportionnalité du poids des corps à leur inertie, de la masse de gravitation à la masse mécanique.

» Reprenons en effet l'exemple du boulet de Jules Verne et supposons qu'au lieu de le laisser en chute libre, nous lui communiquons, par l'intermédiaire d'une corde par exemple, une accélération d'ensemble par rapport à la chute libre. Les objets intérieurs ne pourront suivre ce mouvement qu'à condition d'être soumis de la part de la paroi à une force convenable; ils devront être poussés par cette paroi et viendront presser contre elle du côté opposé à celui où est attachée la corde. Il y aura de nouveau un haut et un bas et les observateurs intérieurs au boulet pourront croire qu'ils sont au repos dans un champ de gravitation proportionnel à l'accélération communiquée à la paroi par la corde. Si même ils regardent au dehors et voient la corde tendue, ils pourront se croire suspendus par cette corde et immobiles dans ce même champ de gravitation. Il y a ainsi *équivalence*, comme dit M. Einstein, entre un champ de gravitation uniforme et une accélération d'ensemble du système de référence.

» On peut aller plus loin et supposer le système de référence en mouvement quelconque à condition d'introduire un champ de gravitation non uniforme et convenablement distribué : il suffit en chaque point d'admettre un champ de gravitation d'intensité égale à l'accélération en ce point du système de référence par rapport à des axes en chute libre et sans rotation. Un point matériel libre, qui se meut en ligne droite par rapport à ces derniers, se mouvra par rapport au système de référence exactement comme il le ferait s'il était soumis à l'action du champ de gravitation indiqué, et nous admettrons qu'il en sera de même pour un rayon lumineux.

» Champ de gravitation et mouvement quelconque du système de référence sont donc indiscernables au point de vue physique. L'emploi d'un système de référence en *rotation* par rapport à des axes de Galilée, comme par exemple l'emploi d'axes liés à la Terre,

est *équivalent* à l'introduction d'un champ de gravitation distribué exactement comme l'accélération centrifuge, comme le champ de force centrifuge. Et nous savons que sur la Terre par exemple la mesure de g faite par un procédé quelconque, dynamique ou statique, pendule ou peson, nous fournit toujours un même résultat que seules des considérations théoriques nous conduisent à décomposer en un champ de force centrifuge et un champ newtonien. Rien ne différencie l'un de l'autre au point de vue de leur influence sur les phénomènes sensibles à leur action, mouvement d'un point matériel, propagation de la lumière, etc.

» Nous voici donc conduits à l'énoncé suivant d'un principe de relativité généralisé : *à condition d'introduire un champ de gravitation convenablement distribué, il est possible d'énoncer les lois de la Physique sous une forme complètement indépendante du système de référence.*

» Tout se passe pour un système de référence en rotation comme s'il était en translation et comportait un champ de gravitation distribué comme le champ de force centrifuge.

» La remarquable puissance du principe ainsi énoncé tient à la possibilité de le traduire analytiquement de la manière suivante, qui exprime le même fait sous une forme plus précise :

» *Les équations qui régissent les lois des phénomènes physiques en présence d'un champ de gravitation quelconque doivent conserver leur forme quand on change d'une manière quelconque le système de référence employé.*

» Cette condition d'invariance généralisée limite extraordinairement les formes possibles pour les lois de l'Univers. Grâce à l'introduction du *calcul différentiel absolu* créé antérieurement par MM. Ricci et Levi-Civita, et qui permet de former les combinaisons jouissant de la propriété requise, M. Einstein a pu déterminer la forme générale des équations de la mécanique et de l'électromagnétisme en présence d'un champ de gravitation quelconque et pour un système de référence quelconque à partir de la forme particulière connue pour l'univers euclidien, c'est-à-dire en l'absence de tout champ de gravitation. Ceci est la traduction mathématique du fait signalé plus haut que les mesures faites à partir d'un système de référence quelconque et dans un champ de gravitation quelconque peuvent se déduire dans chaque région infiniment petite des mesures faites dans un univers euclidien, celui d'observateurs en chute libre dans la région considérée.

» 22. *La loi de gravitation.* — Il restait une dernière étape à franchir. Si l'énergie est sensible au champ de gravitation, comme la masse dans la théorie newtonienne, elle doit aussi contribuer à le produire ou à le modifier. La distribution du champ de gravitation doit être déterminée par celle de l'énergie présente exactement comme Newton prévoit suivant quelle loi le champ de gravitation est déterminé par la distribution des masses attirantes. Il s'agit de trouver la relation qui doit remplacer la loi du carré de la distance traduite analytiquement par l'équation de Poisson.

$$(17) \quad \Delta\varphi = 4\pi G\rho,$$

où φ est le potentiel de gravitation, G la constante de la gravitation et ρ la densité en volume des masses attirantes.

» La loi cherchée doit satisfaire, comme toutes celles de la Physique, à la condition de conserver sa forme pour un changement quelconque du système de référence. En y joignant la condition de comporter la loi de Newton comme première approximation, au même titre que la mécanique de la relativité comporte la mécanique rationnelle comme forme limite pour V infini, M. Einstein a pu déterminer exactement l'expression analytique de cette loi.

» En vertu de cette loi, l'énergie présente dans l'Univers, sous forme de matière ou de rayonnement, détermine en tout point la distribution du champ de gravitation et par suite la façon dont s'y propage la lumière. Toutes les possibilités de mesure, y compris celles de l'espace et du temps se trouvant liées à la manière dont se fait cette propagation, on voit que les propriétés même de l'espace au point de vue géométrique ou cinématique sont influencées par l'énergie présente et l'Univers réel n'est pas euclidien dans son ensemble, si l'on peut le considérer comme tel dans chaque région infiniment petite.

» Le mouvement d'un point matériel libre dans cet Univers et la trajectoire d'un rayon lumineux sont déterminés d'autre part, dès que l'on connaît la distribution du champ de gravitation, par les lois générales de la mécanique et de l'optique conformes au principe de relativité généralisé. En particulier, le mouvement d'un point libre y est encore régi par la condition d'action stationnaire donnée par la formule (8), où l'élément ds d'une ligne d'univers est défini en chaque point par des observateurs en chute libre, c'est-à-dire dans l'univers euclidien tangent à ce point à l'Univers réel, comme l'arc élémentaire d'une courbe tracée sur une surface est défini par des mesures euclidiennes faites dans le plan tangent. Cette condition (8)

a par conséquent le caractère d'invariance requis par le principe de relativité généralisé et l'on peut l'exprimer en disant que la ligne d'univers d'un point matériel libre est une géodésique de l'Univers réel. Le trajet d'un rayon lumineux s'obtient de manière analogue puisque la lumière doit se propager en ligne droite avec la vitesse V pour les observateurs en chute libre voisins d'un point donné quelconque du rayon. Connaissant en chaque point le champ de gravitation, on peut déterminer la courbe cherchée par cette condition qui, comme la précédente, possède évidemment un caractère d'invariance, son énoncé étant indépendant de tout système particulier de référence. Le passage d'un système quelconque à un autre aurait seulement pour effet de changer la distribution du champ de gravitation à admettre et par conséquent la forme des trajectoires ou des rayons qui en résultent, de la manière exigée par l'emploi d'axes en mouvement quelconque par rapport aux premiers.

» Les résultats obtenus par M. Einstein sont d'ailleurs plus généraux encore que je ne l'indique ici, où je m'efforce surtout d'insister sur l'aspect physique des idées. Les lois obtenues restent exactes même lorsqu'on emploie pour repérer chaque événement quatre coordonnées quelconques ne correspondant plus à la décomposition de l'univers cinématique en espace et temps, exactement comme on peut employer pour repérer les points d'une surface ou d'un espace à trois dimensions un système quelconque de coordonnées curvilignes non orthogonales. Il n'est pas nécessaire de s'élever à ce degré d'abstraction pour comprendre ce qui suit.

» 23. *Le champ de gravitation d'un centre.* — L'application la plus immédiate de la loi, conforme au principe de relativité généralisé, suivant laquelle le champ de gravitation est déterminé, est relative au cas d'une seule masse attirante centrale comme le Soleil et au mouvement possible d'un point matériel ou au trajet d'un rayon lumineux dans le champ ainsi défini.

» Il suffit pour cela de prendre les équations qui expriment la loi de distribution dans le vide et de chercher si elles admettent une solution analogue à la solution $\frac{Gm}{r}$ pour le potentiel de gravitation autour d'une masse centrale m . M. Einstein a pu les intégrer par approximations successives, et M. Schwarzschild en a donné la solution rigoureuse.

» Cette solution s'exprime de la manière suivante : si l'on utilise un système de référence lié au centre attirant avec un système de

coordonnées sphériques r, θ, φ pour l'espace et une mesure optique t du temps, si les coordonnées de deux événements infiniment voisins diffèrent de $dr, d\theta, d\varphi, dt$ pour ce système de référence, le champ de gravitation est tel que l'élément de temps propre $d\tau$ ou le $\frac{ds}{V}$ pour des observateurs en chute libre dans leur univers euclidien au voisinage immédiat de ces événements est donné par

$$(18) \quad ds^2 = V^2 d\tau^2 = \left(V^2 - \frac{2GM}{r} \right) dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{V^2 r} \right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

où M représente la masse du corps attirant, du Soleil par exemple.

» 24. *Le mouvement des planètes.* — Partant de là, on peut facilement trouver par la condition (8) le mouvement d'un point libre lancé dans ce champ de gravitation. Il suffit de chercher les géodésiques d'une multiplicité à quatre dimensions ayant l'élément d'arc donné en fonction des coordonnées par la formule (18). Le calcul est très simple et donne pour résultat un mouvement analogue à celui fourni par la loi de Newton, mais un peu plus complexe. Au lieu d'une ellipse fixe (dans le cas où la trajectoire reste à distance finie), on trouve une ellipse qui tourne dans son plan autour du centre d'attraction avec une vitesse angulaire (mouvement du périhélie) donnée en fraction de tour par période par la formule

$$(19) \quad \partial\omega = \frac{3GM}{aV^2(1-e^2)},$$

où a est le demi-grand axe de l'ellipse, e son excentricité.

» En donnant aux constantes les valeurs suivantes, qui correspondent au Soleil comme centre d'attraction et aux éléments a et e de la planète Mercure :

$$\frac{GM}{V^2} = 1,47 \cdot 10^8, \quad a = 5,85 \cdot 10^{12}, \quad e = 0,21$$

et en prenant 88 jours pour la durée de révolution, on trouve au moyen de la formule (19) une rotation du périhélie de $42'',9$ par siècle.

» 25. *Le mouvement de Mercure.* — Or la planète Mercure, depuis bientôt un siècle que Le Verrier en a établi la théorie, fait le désespoir des astronomes par suite d'un désaccord entre le mouvement observé de son périhélie et les prévisions de la mécanique céleste de Newton en tenant compte des perturbations dues aux autres pla-

nètes, Vénus en particulier. Ce désaccord est exactement de 43 secondes d'arc par siècle, et l'on a vainement tenté de l'expliquer par l'hypothèse de planètes intramercurielles que les astronomes ont cherché à voir passer sur le disque du Soleil. Il est tout à fait remarquable que, sans introduction d'aucune hypothèse ou constante arbitraire, par le développement nécessaire de l'idée fondamentale, la théorie de relativité généralisée apporte la solution si longtemps cherchée.

» La nouvelle mécanique céleste fondée sur la loi de gravitation représentée par l'ensemble des formules (8) et (18) se développe en ce moment de divers côtés. Elle n'introduit aucune difficulté en ce qui concerne les planètes autres que Mercure et semble devoir également combler les lacunes qui subsistaient dans la théorie de la Lune conforme à l'ancienne mécanique céleste.

» 26. *La déviation de la lumière.* — La formule (18) permet, comme je l'ai indiqué, de trouver le trajet d'un rayon lumineux qui reste déterminé par la condition de Fermat ou de temps minimum. On n'obtient pas une ligne droite, mais une trajectoire incurvée vers le centre d'attraction, avec une déviation totale donnée par l'expression

$$(20) \quad \alpha' = \frac{4GM}{RV^2}$$

double exactement, comme je l'ai déjà dit, de la valeur donnée par la formule (16).

» On prévoit ainsi pour une étoile vue près du bord du Soleil une déviation vers l'extérieur égale à 1",74 et variant en raison inverse de la distance au centre du Soleil pour les étoiles plus éloignées.

» Les astronomes anglais de Greenwich et d'Oxford ont organisé de manière remarquable deux expéditions destinées à vérifier l'exactitude de ce résultat en profitant de l'éclipse totale qui devait avoir lieu le 29 mai dernier.

» La zone de totalité traversait l'Atlantique au voisinage de l'Équateur, commençant dans l'Amérique du Sud pour finir en Afrique. Les conditions étaient particulièrement favorables, plusieurs étoiles brillantes devant être voisines du Soleil pendant l'éclipse.

» Une première expédition se rendit à Sobral, au Brésil et réussit à prendre une dizaine de photographies pendant les 5 ou 6 minutes que dura la totalité. L'éclipse ayant eu lieu le matin, le mouvement rétrograde du Soleil par rapport aux étoiles fit en sorte qu'au bout de deux mois environ la même région du ciel fut visible de nuit et

put être de nouveau photographiée avec les mêmes appareils pour permettre la comparaison. Le déplacement moyen ramené au bord du Soleil fut trouvé égal à $1'',98$. L'autre expédition s'installa dans la petite île portugaise de Principe, sur la côte ouest d'Afrique et rencontra des conditions moins favorables, le ciel ne s'étant découvert qu'aux derniers instants de l'éclipse. Néanmoins les clichés obtenus ont donné pour la déviation ramenée au bord en tenant compte de la relation (20) la valeur $1'',60 \pm 0'',3$.

» Il est remarquable que la moyenne entre les résultats des deux expéditions, $1'',79$, coïncide exactement avec la valeur prévue. L'accord existe non seulement en moyenne, mais aussi dans les déplacements individuels observés sur les diverses étoiles et qui varient suivant la loi prévue avec leur distance au centre du Soleil.

» La déviation en raison inverse de la distance au centre du Soleil, avec la grandeur exactement conforme au chiffre prévu, ne peut d'ailleurs pas s'expliquer par l'hypothèse d'une réfraction due à l'existence d'une atmosphère ou de matière cosmique autour du Soleil, et s'étendant jusqu'aux distances pour lesquelles les mesures ont été faites.

» Il est facile, en effet, de chercher quelle densité devrait avoir une telle atmosphère pour produire l'effet observé en la supposant constituée par les gaz dont nous connaissons l'existence à la surface du Soleil. On trouve ainsi que la densité, à une distance du bord du Soleil égale à son rayon, devrait être égale environ au centième de la densité de notre atmosphère terrestre au voisinage du sol. L'énormité des distances traversées à travers un tel milieu par la lumière venant des étoiles vues au voisinage du Soleil est telle que, par diffusion analogue à celle qui donne le bleu du ciel, cette lumière serait considérablement affaiblie dans sa direction primitive. Au contraire, l'expérience montre que l'éclat des étoiles n'est pas modifié de manière appréciable par la proximité du Soleil.

» D'autre part, des comètes ont été suivies dans ces régions et n'ont manifesté aucun ralentissement sensible alors que la matière si ténue qui les compose éprouverait une résistance énorme au passage de la part d'une atmosphère de cette densité.

» Voici donc une série de faits expérimentaux qui imposent à l'attention de tous la théorie de relativité. Sa pleine intelligence demande un grand effort : il faut se dégager d'habitudes ancestrales dont notre langage est tout imprégné ; il faut remanier ces catégories du temps et de l'espace que nous considérons comme des formes nécessaires de notre pensée. Nous ne devons pas être surpris

de constater que des moyens d'investigation expérimentale plus précis nous conduisent à cette nécessité : nos idées sont formées par l'expérience du passé, personnelle ou héréditaire, et leur adaptation progressive aux faits, douloureuse parfois mais toujours saine et fortifiante, ne saurait être éludée. »

M. le PRÉSIDENT. — « Lorsque les maîtres de la Science se donnent la peine de venir apporter le résultat de leurs études aux ingénieurs qui composent en grande partie notre Société, nous devons leur être fort reconnaissants.

» Pour ma part, je suis fort attentif lorsque je vois M. Langevin définir et employer des vitesses de l'ordre de 100 000 km à la seconde, et je songe avec envie à leur application industrielle et aux facilités qu'elles apporteraient à la crise actuelle des transports.

» Quoi qu'il en soit, c'est une bonne fortune pour nous d'avoir, après une journée de labeur, l'occasion de nous recueillir pendant quelques moments tout en nous instruisant.

» Je prie donc M. Langevin d'agréer l'expression de notre profonde admiration pour les travaux si délicats qu'il vient de nous exposer et je suis sûr d'être votre interprète en lui adressant tous nos remerciements. »

CORRESPONDANCE.

Comme suite à la Communication de M. Brillouin, M. P. Boucherot a adressé à M. le Président de la Société française des Électriciens la lettre suivante :

« MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

» M. L. Brillouin a bien voulu, dans son intéressante Communication sur les « Mesures électriques en haute fréquence », dire quelques mots d'un petit alternateur à haute fréquence que j'ai étudié pour la Radiotélégraphie militaire, et je l'en remercie.

» Mais dans les conditions d'emploi qu'il rappelle ($\lambda = 5000$ m, $F = 60\,000$ périodes par seconde), cet appareil était loin encore de ce qu'il pouvait faire, et je désire alors en dire quelques mots; il n'est pas difficile, en effet, de faire un alternateur de quelques watts à $60\,000$ p.p.s.; Duddel, si je ne me trompe, était arrivé, quelques années avant la guerre, à $80\,000$ ou $100\,000$ p.p.s.

» Je me suis proposé, en réalité, de faire un alternateur pouvant donner jusqu'à $200\,000$ p.p.s. (c'est-à-dire $\lambda = 1500$ m) en tournant à $120\,000$ tours par minute.

» Je l'ai fait tourner moi-même plusieurs fois à $90\,000$ tours par minute (soit $150\,000$ p.p.s.), mais je ne voulais pas aller au delà avant que M. Armagnat s'en fût servi pour des étalonnages d'ondemètres autour du $\lambda = 5000$ m. Quand je le lui ai remis, au Laboratoire de l'École de Physique et de Chimie, nous avons fait ensemble une expérience d'étalonnage d'un ondemètre n'allant que jusqu'à 4000 m (c'est-à-dire pour des fréquences supérieures à $75\,000$ p.p.s.). Je ne m'en suis plus occupé, mais je suis à peu près certain qu'il ne casserait pas à $120\,000$ tours par minute ou $200\,000$ p.p.s.

» C'est, d'ailleurs, un alternateur assez banal : homopolaire, à deux bobines magnétisantes, sans fer dans l'induit bien entendu, dont on utilise la fréquence fondamentale (il n'a pas d'harmoniques, ou tout au moins on n'a pas pu les déceler à l'hétérodyne); une seule particularité intéressante brevetée, que je ne puis divulguer parce que le Ministre du Commerce me l'a interdit alors.

» Si j'ai tenu à apporter ces quelques explications, c'est qu'il pourrait se trouver quelqu'un que cette réalisation intéresse. Tel que, ce premier modèle a quelques défauts qu'on pourrait faire disparaître dans un second (lorsque M. le Ministre aura levé son interdiction, mais quand ?).

» Veuillez, agréer, M. le Président, etc. » P. BOUCHEROT. »

COMPTE RENDU

DE

L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE EXTRAORDINAIRE

du 22 décembre 1919.

PRÉSIDENCE DE M. N. MAZEN.

La séance est ouverte à 20 h 40 m.

M. le PRÉSIDENT expose que, conformément à l'article 8 des Statuts, le Comité d'administration du 8 décembre a décidé de convoquer une Assemblée générale extraordinaire et en a fixé l'ordre du jour.

Cet ordre du jour comporte l'approbation des propositions I, II et III ainsi conçues :

PROPOSITION I.

Le texte des articles 1 à 9 du Règlement intérieur est modifié de la manière suivante :

ARTICLE PREMIER. — Le montant de la cotisation annuelle est fixé à 50 fr.

ART. 9. — Les Membres peuvent se libérer de toute cotisation moyennant le paiement d'une somme de 750 fr, effectué soit en un versement, soit en deux versements annuels de 375 fr, pendant deux années consécutives, soit en trois versements annuels de 250 fr, pendant trois années consécutives.

Dans le cas où ils cesseraient de faire partie de la Société avant le versement de la totalité des annuités précédemment indiquées, les versements effectués demeureront acquis à la Société.

PROPOSITION II.

La modification ci-dessus de l'article 1 du Règlement intérieur entrera en vigueur à partir du 1^{er} janvier 1920.

La modification de l'article 9 entrera en vigueur immédiatement,

PROPOSITION III.

M. C.-O. Mailloux, ancien Président de l'American Institute of Electrical Engineers, Président de la Commission électrique internationale, Délégué officiel de l'American Metric Association, est nommé Membre d'honneur de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT donne la parole à M. le Secrétaire général qui fait connaître que les modifications proposées aux articles 1 et 9 du Règlement intérieur, conformément à la proposition I, consistent à doubler le chiffre précédemment en vigueur. M. le Secrétaire général fait l'exposé des raisons qui ont amené le Bureau et le Comité à proposer cette augmentation. (Accroissement du prix de toutes choses : impressions, frais d'administration ; pertes subies du fait de la guerre.)

M. le Président lit et met aux voix la proposition I.

La proposition I est adoptée à l'unanimité.

M. le Président lit et met aux voix la proposition II.

La proposition II est adoptée à l'unanimité.

Proposition III : M. le Président donne la parole à M. le Secrétaire général qui rappelle les services de toutes sortes rendus à la cause française par M. C.-O. Mailloux qui, du fait de ses fonctions de Président de la Commission électrique internationale, a sa place indiquée parmi les Membres d'honneur de la Société française des Electriciens.

M. le Président lit et met aux voix la proposition III.

La proposition III est adoptée à l'unanimité.

La séance est levée à 20 h 50 m.

IL Y A TRENTE ANS.

Décembre 1889. — Sur la théorie chimique des accumulateurs, par M. S. DRZEWIECKI.
— L'éclairage électrique appliqué aux voitures de chemins de fer par les accumulateurs, par M. J. SARCIA. — L'identité de la lumière et de l'électricité, par M. HENRI HERTZ.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE TOME IX (3^e SÉRIE).

Bibliographie.

	Pages.
Applications de la Physique pendant la guerre (Les), par M. H. Vigneron.....	504
Cours de Physique générale, par M. H. Ollivier.....	504
Dictionnaire des termes techniques de Télégraphie-Téléphonie française, par M. L. Tissot-Dupont.....	583
Électrochimie et Électrometallurgie, par M. Albert Levasseur.....	364
Industries électriques d'hier et de demain, par M. Maurice Soubrier.....	365
Éveil de l'Esprit public (L'). Études publiées sous la direction de M. Henri Fayot..	364
Le tube Coolidge. Les applications scientifiques, médicales et industrielles, par M. H. Pilon.....	585
Schémas et règles pratiques de bobinage des machines électriques, par MM. F. Torices et A. Curchod.....	584
Surchauffe de la vapeur (La). Ses avantages, par l'Institut scientifique et industriel.	584
Théorie des enroulements des machines à courant continu, par M. G. Szarvady....	440
Unités électriques, par M. G. Szarvady.....	583

Communications diverses.

Allocution de M. Larnaude, Président sortant.....	270
Allocution de M. Mazen, Président entrant.....	308
Assemblée générale annuelle.....	198
Assemblée générale extraordinaire.....	641
Comité d'administration (Renouvellement du).....	122
Correspondance.....	304, 499, 640
Création d'une chaire d'Électrotechnique générale.....	174
Distinctions honorifiques.....	75, 198
Dons au Laboratoire central et à l'École supérieure d'Électricité.....	444
Échange de télégrammes avec la « British Institution of Electrical Engineers ».....	446
Enseignement de la T.S.F. à l'École supérieure d'Électricité (Note sur l').....	124
Errata.....	366, 506
Fixation de la liste des fonctions pouvant être remplies par les Membres de la Société et rétribuées conformément à l'article 7 des Statuts.....	199
Fondation Édouard Cohen.....	124

	Pages.
Il y a trente ans.....	72, 119, 196, 306, 366, 442, 506, 586, 642
Information.....	586
Membres décédés et Sociétaires tués à l'ennemi.....	6, 74, 122, 198, 444, 508
Membres titulaires (Admission de).....	6, 74, 122, 198, 308, 367, 443, 507, 588
Ouvrages offerts à la Société.....	441
Projet de Règlement intérieur d'administration.....	115
Rapport annuel sur le Laboratoire central et l'École supérieure d'Électricité (M. P. Janet).....	212
Rapport de la Commission des Comptes (M. Marcel Meyer).....	200
Rapport du Comité d'administration (M. le Secrétaire général).....	208
Renouvellement des Membres du Bureau, du Comité d'administration et de la Com- mission des Comptes. Résultat des élections : MM. Benoit et Thury, Membres d'honneur	268
Réunion ordinaire mensuelle du 9 janvier 1919.....	6
Réunion ordinaire mensuelle du 5 février 1919.....	74
Réunion ordinaire mensuelle du 5 mars 1919.....	122
Réunion ordinaire mensuelle du 2 avril 1919.....	198
Réunion ordinaire mensuelle du 7 mai 1919.....	307
Réunion ordinaire mensuelle du 4 juin 1919.....	367
Réunion ordinaire mensuelle du 2 juillet 1919.....	443
Réunion ordinaire mensuelle du 5 novembre 1919.....	507
Réunion ordinaire mensuelle du 3 décembre 1919.....	587
Révision du Règlement intérieur.....	124
Situation financière.....	204
Souscription pour la Chaire d'Électrotechnique générale.....	124, 199
Tableau d'honneur des Sociétaires victimes de la guerre.....	211
Tarif du Laboratoire central d'Électricité.....	177

Communications techniques.

Alternateurs à haute fréquence (Les), par M. Marius Latour	97
Amplificateurs divers, par M. Marius Latour.....	465
Amplificateurs réciproques et réversibles pour lignes téléphoniques, par M. Marius Latour.....	589
Avenir de l'industrie électrique en Roumanie, par M. Hurmuzescu.....	43
Câbles électriques à haute tension (Notes et Remarques sur les), par M. Lebaupin..	447
Discussion, par M. Grosselin.....	458
Discussion, par M. Masson.....	462
Étude sur la marche en parallèle des alternateurs, par M. de Marchena.....	17
Étude sur la traction en courant continu. Alimentation des réseaux de tramways et de métropolitains, par M. Guéry.....	509
La grande traction par l'électricité, par M. N. Mazen.....	311
Le chemin de fer électrique à écartement de 0,60 m (Mémoire présenté), par M. Esbran.....	53
Machines électriques à haute fréquence et leur réglage (Sur les), par M. Bethenod..	161

	Pages
Mesures électriques en haute fréquence, par M. Brillouin.....	555
Modes d'emploi du collecteur en courant polyphasé (Sur certains), par M. Gratzmuller.....	369
Nouvelles installations dans les grandes centrales américaines réalisées ou projetées durant ces trois dernières années, par M. Sosnowski.....	219
Principe de relativité (Sur le), par M. Langevin.....	601
Programme d'électrification partielle des chemins de fer français; expérience actuellement acquise en France et à l'étranger dans l'électrification des grandes lignes, par M. Mauduit.....	127, 273, 333
Récents progrès de la téléphonie sans fil (Les), par M. Gutton.....	323
Recherches sur le fonctionnement chimique de l'accumulateur au plomb, par M. Ch. Féry.....	85
Remarques sur les caractéristiques d'alternateurs, par M. M. Doligez.....	485
Remarques sur le fonctionnement des machines polyphasées à collecteur, par M. P. Ehrmann.....	77
Systèmes actuels de télégraphie rapide (Les) (Expériences), par M. Montoriol....	385
Un point rétrospectif dans l'histoire des unités électriques : les mesures internationales de Washington, par M. Paul Janet.....	7

Résumé des Communications étrangères.

Alimentation d'énergie monophasée par des systèmes triphasés, par M. Walker (Résumé).....	582
Amélioration du facteur de puissance considéré comme une conséquence de l'unification des fréquences (L'), par M. A. Cusmano.....	580
Appareils de chauffage électrique basés sur l'induction magnétique, par M. A. Ponzini.....	362
Appareils pour l'essai des aimants de magnétos, par M. G. Martinez.....	581
Application de l'analyse harmonique à la théorie des machines à courant alternatif synchrones, par M. W.-V. Lyon.....	579
Carte en relief de la charge annuelle; analyse de la charge de pointe et du facteur de charge, par M. W. Le Roy Robertson.....	501
Caractéristiques d'isolement des câbles à haute tension, par MM. W.-S. Clark et G.-B. Shanklin.....	435
Chute de tension dans les lignes aériennes triphasées, par M. G.-N. Wright.....	438
Conditions de marche à vide des moteurs d'induction monophasés, par M. R.-E. Hellmund.....	502
Constantes électriques pour le calcul des lignes aériennes, par M. R. Norsa.....	577
Contrôle des grosses quantités d'énergie (Le), par M. E.-B. Wedmore.....	573
Corona dans l'hydrogène, et le redressement des courants alternatifs (La), par MM. J.-W. Davis et C.-S. Breese.....	361
Détermination des phases d'après lectures du wattmètre, par M. G. Kapp.....	434
Développement de la soudure électrique aux États-Unis (Le), par M. H.-A. Hornor..	577
Distribution du flux magnétique dans les tôles d'acier annulaires, par MM. A.-E. Kennelly et M. P.-L. Alger.....	500

	Pages.
Effets de dilatation considérés comme cause de détérioration des isolateurs à suspensions, par M. J.-A. Brundige.....	362
Effets inductifs des chemins de fer à courant alternatif sur les circuits de communication, par M. H.-S. Warren.....	576
Énergie électrique pour la fixation de l'azote (L'), par M. E.-K. Scott.....	575
Essais de couronne à haute altitude, par M. B.-F. Jakobsen.....	500
Étude mathématique de la force magnétomotrice des bobinages d'induit, par M. B. Hagne.....	438
Fonctionnement et entretien des câbles souterrains, par M. J.-L. Harper.....	362
Illuminations de l'Exposition du Panama Pacific, par M. W. d'Aryon.....	437
Influence des pertes diélectriques sur le régime des câbles souterrains à haute tension par MM. A.-F. Bang et H.-C. Louis.....	436
Génératrices à courant continu à potentiel constant pour une vitesse variable, par M. S.-R. Bergmann.....	576
Lignes aériennes de transport d'énergie à haute tension, par M. G.-V. Twiss.....	437
Ligne artificielle de transport d'énergie, par M. G.-H. Gray.....	438
Ligne de transport d'énergie à 110 000 volts au-dessus de la rivière du Saint-Laurent, par M. S. Svennington.....	578
Méthode pour mesurer la puissance des circuits triphasés quand φ est voisin de zéro, par M. E. Biffi.....	439
Moteur d'induction triphasé alimenté par des tensions dissymétriques (Le), par M. C. Della Salda.....	434
Parafoudre à oxyde et à pellicule (Le), par M. C. Field.....	574
Pratique actuellement en usage dans le calcul et la fabrication des isolateurs à haute tension (La), par M. A. O. Austin.....	435
Réactance des machines synchrones, par MM. R.-E. Doherty et O.-E. Shyrley....	575
Régime et choix des interrupteurs à huile, par MM. E.-M. Hewlett, J.-M. Mahoney et G.-A. Burham.....	502
Résistivité et coefficient de température de l'aluminium, par M. G. Grassi.....	578
Revue critique de la bibliographie relative à l'attraction magnétique non équilibrée dans les dynamos, par MM. A. Gray et J.-G. Pertsch.....	580
Rigidité diélectrique des pellicules d'air incluses dans un isolant solide; application au calcul des bobines et câbles d'alternateurs, par M. F. Dubsky.....	581
Secomor ou dispositif mécanique pour déterminer les caractéristiques d'un moteur polyphasé série à collecteur (Le), par M. V. Karapetoff.....	502
Système de distribution électrique souterraine, par M. G.-J. Newton.....	573
Unification des tensions en Italie (L'), par M. E. Soleri.....	578
Unification des tensions et des fréquences (Vers l'), par M. G. Rehora.....	579
Usine hydro-électrique automatique de Cedar Rapids (L'), par MM. J.-M. Drabelle et L.-B. Bonnett.....	503

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS

CITÉS DANS LE TOME IX (3^e SÉRIE).

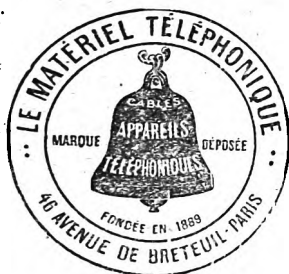
	Pages.
ALGER (P.-L.) et KENNELLY (A.-E.). — Distribution du flux magnétique dans les tôles d'acier annulaires (Résumé).....	500
AUSTIN (A.-O.). — La pratique actuellement en usage dans le calcul et la fabrication des isolateurs à haute tension (Résumé).....	435
BANG (A.-F.) et LOUIS (H.-C.). — Influence des pertes diélectriques sur le régime des câbles souterrains à haute tension (Résumé).....	436
BERGMANN (S.-R.). — Génératrices à courant continu à potentiel constant pour une vitesse variable (Résumé).....	576
BETHENOD (J.). — Sur les machines électriques à haute fréquence et leur réglage....	161
BIFFI (E.). — Méthode pour mesurer la puissance des circuits triphasés quand $\cos \varphi$ est voisin de zéro (Résumé).....	439
BONNETT (L.-B.) et DRABELLE (J.-M.). — L'usine hydro-électrique automatique de Cedar Rapids (Iowa) (Résumé).....	503
BREESE (C.-S.) et DAVIS (J.-W.). — La corona dans l'hydrogène, et le redressement des courants alternatifs (Résumé).....	361
BRILLOUIN. — Mesures électriques en haute fréquence.....	555
BRUNDIGE (J.-A.). — Effets de dilatation considérés comme cause de détérioration des isolateurs à suspension (Résumé).....	362
BURHAM (G.-A.), MAHONEY (J.-M.) et HEWLETT (E.-M.). — Régime et choix des interrupteurs à huile (Résumé).....	502
CLARK (W.-S.) et SHANKLIN (G.-B.). — Caractéristiques d'isollements des câbles à haute tension (Résumé).....	435
CURCHOD (A.) et TORICES (F.). — Schémas et règles pratiques de bobinage des machines électriques (<i>Bibl.</i>).....	584
CUSMANO (A.). — Amélioration du facteur de puissance considéré comme une conséquence de l'unification des fréquences (Résumé).....	580
DAVIS (J.-W.) et BREESE (C.-S.). — La corona dans l'hydrogène, et le redressement des courants alternatifs (Résumé).....	361
DELLA SALDA (C.). — Le moteur d'induction triphasé alimenté par des tensions dissymétriques (Résumé).....	434
DOHERTY (R.-E.) et SHIRLEY (O.-E.). — Réactance des machines synchrones (Résumé).....	575
DOLIGEZ (Marcel). — Remarques sur les caractéristiques d'alternateurs.....	485
DRABELLE (J.-M.) et BONNETT (L.-B.). — L'usine hydro-électrique automatique de Cedar Rapids (Iowa) (Résumé).....	503

	Pages.
DUBSKY (F.). — Rigidité diélectrique des pellicules d'air incluses dans un isolant solide; application au calcul des bobines et câbles d'alternateurs (Résumé)....	581
EHRMANN (P.). — Remarques sur le fonctionnement des machines polyphasées à collecteur.....	77
ESBRAN. — Le chemin de fer électrique à écartement de 0,60 m.....	53
FAYOT (Henri). — L'éveil de l'Esprit public. — Études publiées sous la direction de M. H. Fayot (<i>Bibl.</i>).....	364
FÉRY (Charles). — Recherches sur le fonctionnement chimique de l'accumulateur au plomb.....	85
FIELD (C.). — Le parafoudre à oxyde et à pellicule (Résumé).....	574
GRASSI (G.). — Résistivité et coefficient de température de l'aluminium (Résumé)..	578
GRATZMULLER (L.). — Sur certains modes d'emploi du collecteur en courant polyphasé.....	369
GRAY (A.) et PERTSCH (J.-G.). — Revue critique de la bibliographie relative à l'attraction magnétique non équilibrée dans les dynamos (Résumé).....	580
GRAY (G.-H.). — Ligne artificielle de transport d'énergie (Résumé).....	438
GROSSELIN. — Discussion.....	458
GUÉRY. — Étude sur la traction en courant continu. Alimentation des réseaux de tramways et de métropolitains.....	509
GUTTON. — Les récents progrès de la téléphonie sans fil.....	323
HAGNE (B.). — Étude mathématique de la force magnétomotrice des bobinages d'induit (Résumé).....	438
HARPER (J.-L.). — Fonctionnement et entretien des câbles souterrains (Résumé)...	362
HELLMUND (R.-E.). — Conditions de marche à vide des moteurs d'induction monophasés (Résumé).....	502
HEWLETT (E.-M.), BURHAM (G.-A.) et MAHONEY (J.-M.). — Régime et choix des interrupteurs à huile (Résumé).....	502
HORNER (H.-A.). — Le développement de la soudure électrique aux États-Unis (Résumé).....	577
HURMUZESCU. — Avenir de l'Industrie électrique en Roumanie.....	43
INSTITUT SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIEL. — La surchauffe de la vapeur : ses avantages (<i>Bibl.</i>).....	584
JAKOBSEN (B.-F.). — Essais de couronne à haute altitude (Résumé).....	500
JANET (P.). — Rapport annuel sur le Laboratoire central et l'École supérieure d'Électricité.....	212
JANET (P.). — Un point rétrospectif dans l'histoire des unités électriques : les mesures internationales de Washington.....	7
JOLY (Louis). — Rapport du Comité d'administration.....	208
KAPP (G.). — Détermination des phases d'après lectures du wattmètre (Résumé)...	434
KARAPETOFF (V.). — Le « Secomor » ou dispositif mécanique pour déterminer les caractéristiques d'un moteur polyphasé série à collecteur (Résumé).....	502
KENNELLY (A.-E.) et ALGER (P.-L.). — Distribution du flux magnétique dans les tôles d'acier annulaires (Résumé).....	500
LANGEVIN. — Sur le principe de relativité.....	601
LARNAUDE (A.). — Allocution de M. le Président sortant.....	270
LATOUR (Marius). — Les alternateurs à haute fréquence.....	97

	Pages.
LATOUR (Marius). — Amplificateurs divers.....	465
LATOUR (Marius). — Amplificateurs réciproques et réversibles pour lignes téléphoniques.....	589
LEBAUPIN. — Notes et remarques sur les câbles électriques à haute tension.....	447
LE ROY ROBERTSON (W.). — Carte en relief de la charge annuelle; analyse de la charge de pointe et du facteur de charge (Résumé).....	501
LEVASSEUR (Albert). — Electrochimie et Electrometallurgie (<i>Bibl.</i>).....	364
LOUIS (H.-C.) et BANG (A.-F.). — Influence des pertes diélectriques sur le régime des câbles souterrains à haute tension (Résumé).....	436
LYON (W.-V.). — Application de l'analyse harmonique à la théorie des machines à courant alternatif synchrones (Résumé).....	579
MAHONEY (J.-M.), HEWLETT (E.-M.) et BURHAM (G.-A.). — Régime et choix des interrupteurs à huile (Résumé).....	502
MARTINEZ (G.). — Appareils pour l'essai des aimants de magnétos (Résumé).....	581
MARCHENA (M. DE). — Étude sur la marche en parallèle des alternateurs.....	17
MASSON. — Discussion.....	462
MAUDUIT. — Programme d'électrification partielle des chemins de fer français; expérience actuellement acquise en France et à l'étranger dans l'électrification des grandes lignes.....	127, 273, 333
MAZEN (N.). — Allocution de M. le Président.....	308
MAZEN (N.). — La grande traction par l'électricité.....	311
MEYER (Marcel). — Rapport de la Commission des Comptes.....	200
MONTORIOL. — Les systèmes actuels de télégraphie rapide (Expériences).....	385
NEWTON (G.-J.). — Système de distribution électrique souterraine (Résumé).....	573
NORSA (R.). — Constantes électriques pour le calcul des lignes aériennes (Résumé).....	577
OLLIVIER (H.). — Cours de Physique générale (<i>Bibl.</i>).....	504
PERTSCH (J.-G.) et GRAY (A.). — Revue critique de la bibliographie relative à l'attraction magnétique non équilibrée dans les dynamos (Résumé).....	580
PILON (H.). — Le tube Coolidge. Ses applications scientifiques, médicales et industrielles (<i>Bibl.</i>).....	585
PONZINI (A.). — Appareils de chauffage électrique basés sur l'induction magnétique (Résumé).....	362
REBORA (G.). — Vers l'unification des tensions et des fréquences (Résumé).....	579
RYON (W. d'A.). — Illumination de l'Exposition du Panama Pacific (Résumé).....	437
SCOTT (E.-K.). — L'énergie électrique pour la fixation de l'azote (Résumé).....	575
SHANKLIN (G.-B.) et CLARK (W.-S.). — Caractéristiques d'isolement des câbles à haute tension (Résumé).....	435
SHIRLEY (O.-E.) et DOHERTY (R.-E.). — Réactance des machines synchrones (Résumé).....	575
SOLERI (E.). — L'unification des tensions en Italie (Résumé).....	578
SOSNOWSKI. — Nouvelles installations dans les grandes centrales américaines réalisées ou projetées durant ces trois dernières années.....	219
SOUBRIER. — Industries électriques d'hier et de demain (<i>Bibl.</i>).....	365
SVENINGTON (S.). — Ligne de transport d'énergie à 110 000 volts au-dessus de la rivière du Saint-Laurent (Résumé).....	578
SZARVADY (G.). — Théorie des enroulements des machines à courant continu (<i>Bibl.</i>).....	440

	Pages.
SZARVADY (G.). — Unités électriques (<i>Bibl.</i>).....	583
TISSOT-DUPONT (L.). — Dictionnaire des termes techniques de Télégraphie-Téléphonie français-anglais et anglais-français (<i>Bibl.</i>).....	583
TORICES (F.) et CURCHOD (A.). — Schémas et règles pratiques de bobinage des machines électriques (<i>Bibl.</i>).....	584
TWISS (G.-V.). — Lignes aériennes de transport d'énergie à haute tension (Résumé)..	437
VIGNERON (H.). — Les applications de la Physique pendant la guerre (<i>Bibl.</i>).....	504
WALKER (M.). — Alimentation d'énergie monophasée par des systèmes triphasés (Résumé).....	582
WARREN (H.-S.). — Effets inductifs des chemins de fer à courant alternatif sur les circuits de communication (Résumé)	576
WEDMORE (E.-B.). — Contrôle des grosses quantités d'énergie (Résumé).....	573
WRIGHT (G.-N.). — Chute de tension dans les lignes aériennes triphasées (Résumé).	438

"LE MATÉRIEL TÉLÉPHONIQUE"



SOCIÉTÉ ANONYME AU CAPITAL DE UN MILLION

Ancienne Maison G. ABOILARD & C^{ie}

PARIS - 46. Avenue de Breteuil - PARIS

Téléphone { SAXE 07-14
 - 07-03



Adresse télégraphique
MICROPHONE-PARIS

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}

Quai des Grands-Augustins, 55, à Paris (6^e)

Envoi franco dans toute l'Union postale contre mandat de poste ou valeur sur Paris

CONFÉRENCES FAITES A L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ

LES

CANALISATIONS ISOLÉES

Par J. GROSSELIN

In-8 (25-16). DE VI-96 PAGES, AVEC 26 FIGURES ET 2 PLANCHES; 1912 3 FR. 75

Majoration temporaire 50 %.

NICOL (Donald Mc), Membre associé de l'A. I. E. E.,

Membre du Conseil technique

de la « Postal Télégraph Cable C^o »

LA TÉLÉGRAPHIE EN AMÉRIQUE

Traduit de l'anglais par F. PICAULT et G. VIARD,

Ingénieurs des Postes et Télégraphes (*Biblioth. des Annales des P. T. et T.*).

In-8 (25-16) de vi-278 pages, avec 263 figures; 1917. 11 fr.

Majoration temporaire : 50 %.

GEOFFORY & DELORE

CABLES ÉLECTRIQUES

CLICHY (Seine)

Téléph. : Marcadet 11.58

28, Rue des Chasses.

Téléph. : Marcadet 03.71

UNIS-FRANCE

Compagnie Française pour l'exploitation des procédés

Thomson-Houston

Capital : 120.000.000 de francs.

Siège social et bureaux : 10, rue de Londres, PARIS.

TÉLÉPHONES :

Gutenberg : 00-15

58-23

58-81

Adr. Télégraphique :

Elihu-Paris



Louvre : 31-94

21-55

21-84

22-24

22-70

Machines Électriques

Lampes "Mazda"

Piles "Mazda"

Téléphones - Fils

et Cables - Tableaux

et Appareillage

Accumulateurs

MAISON BREGUET

SOCIÉTÉ ANONYME, AU CAPITAL DE 4.000.000 DE FRANCS.

Siège Social : PARIS, 19, Rue Didot :: Ateliers : PARIS et DOUAI

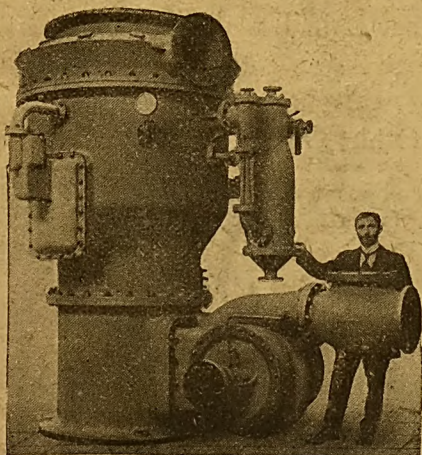
Service commercial : 34, Rue de Châteaudun.

CONDENSEURS PAR MÉLANGE ET PAR SURFACE

munis de l'extracteur d'air

ÉJECTAIR BREGUET

(Brevets Delaporte.)



CONDENSATIONS de
STATIONS CENTRALES
Toutes applications du VIDE

Condenseur par mélange 26.000 k. vap/h.

Notices et Références sur demande.

